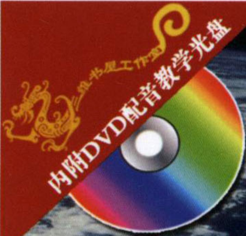



ANSYS工程应用系列丛书

三维书屋工作室
贾长治　胡仁喜　等编著

# ANSYS 14.5/FLOTRAN 流场分析从入门到精通

视频操作 ▪ 源文件 ▪ 最终效果




全面完整的知识体系
深入浅出的理论阐述
循序渐进的分析讲解
实用典型的实例引导



本丛书包含各书目分别由ANSYS工程应用领域的专家和学者执笔编写，书中溶入了他们多年研究的经验和体会，为了便于读者快速掌握ANSYS工程开发技巧，书中引用大量的工程案例。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

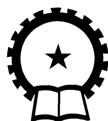
VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

# ANSYS 14.5/FLOTRAN 流场分析从入门到精通

三维书屋工作室

贾长治 胡仁喜 等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书共11章。第1章介绍了FLOTRAN分析概念和分析类型，使读者对FLOTRAN有初步的了解；第2章介绍了FLOTRAN分析的基本原理与基本属性；第3章介绍了FLOTRAN特性，包括坐标系、旋转参考系、涡流和分布式阻力的设置方法以及FLOTRAN命令的设置；第4章介绍了FLOTRAN CFD求解器和矩阵方程；第5章介绍了层流和湍流不可压缩流动FLOTRAN分析及实例；第6章介绍了可压缩流动FLOTRAN分析及实例；第7章介绍了VOF模型分析及实例；第8章介绍了FLOTRAN热分析及实例；第9章介绍了动网格的ALE分析及实例；第10章介绍了多组分传输分析及实例；第11章介绍了声学分析及实例。在各专题的讲解中，都介绍了相应的基本概念、理论以及利用ANSYS软件进行分析的基本过程，还介绍了相关的求解步骤。

本书适合流体力学专业高年级本科生或研究生作为自学教材，也可以作为流体力学研究人员和工程技术人员的参考学习资料。

**图书在版编目（CIP）数据**

ANSYS 14.5/FLOTRAN流场分析从入门到精通/贾长治等编著.
—2版. —北京：机械工业出版社，2013.11
ISBN 978-7-111-44902-7

Ⅰ.①A… Ⅱ.①贾… Ⅲ.①流场—流体力学—工程力学—计算机仿真—应用软件 Ⅳ.①TB126-39②0657.7-39

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第281961号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
策划编辑：曲彩云 责任编辑：曲彩云
责任印制：刘 岚
北京中兴印刷有限公司印刷
2014年2月第2版第1次印刷
184mm×260mm · 24.5印张 · 607千字
0 001—3 000册
标准书号：ISBN 978-7-111-44902-7
ISBN 978-7-89405-197-4（光盘）
定价：66.00元（含1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
策划编辑：(010)88379782
电话服务
网络服务
社服务中心：(010)88361066 教材网：http://www.cmpedu.com
销售一部：(010)68326294 机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：(010)88379649 机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前　言

ANSYS 是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。它能与多数 CAD 软件（如 Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor、I－DEAS、AutoCAD 等）进行连接，实现数据的共享和交换，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。

ANSYS 软件可广泛地用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利和日用家电等一般工业及科学研究。ANSYS 软件的研究与开发不断汲取当今计算方法和计算机技术的最新发展成果，领导着有限元发展的趋势，并为全球工业界广泛接受，拥有全球最大的用户群。

目前，我国越来越多的专家和学者正在应用 ANSYS 进行各种问题的计算和分析，但相对缺乏的是 ANSYS/FLOTRAN 相关的学习和研究资料。出于此目的，我们结合自己的实际应用经验编写了本书，希望能满足读者的需求。

FLOTRAN 是常规流体分析模块，基于有限元方法，涵盖层流/湍流、不可压缩流/可压缩流、牛顿流/非牛顿流等常规流体计算功能而开发。

全书共 11 章。第 1 章介绍了 FLOTRAN 的基本概念和分析类型，使读者对 FLOTRAN 有初步的了解；第 2 章介绍了 FLOTRAN 分析的基本原理及基本属性，具体内容包括 FLOTRAN 单元特点、FLOTRAN 分析步骤、FLOTRAN 分析工具、比热容、密度和导热系数、粘度、表面张力系数以及壁面静态接触角等；第 3 章介绍了 FLOTRAN 特性，包括坐标系、旋转参考系、涡流和分布式阻力的设置方法以及 FLOTRAN 命令的设置；第 4 章介绍了 FLOTRAN CFD 求解器和矩阵方程，包括三对角矩阵算法、半直接共轭方向法和高斯消去法 3 种算法等；第 5 章介绍了层流和湍流不可压缩流动 FLOTRAN 分析及实例；第 6 章介绍了可压缩流动 FLOTRAN 分析及实例；第 7 章介绍了 VOF 模型分析及实例；第 8 章介绍了 FLOTRAN 热分析及实例；第 9 章介绍了动网格的 ALE 分析及实例；第 10 章介绍了多组分传输分析及实例；第 11 章介绍了声学分析及实例。在各专题的讲解中，都介绍了相应的基本概念、理论以及利用 ANSYS 软件进行分析的基本过程，还介绍了相关的求解步骤。

本书的最大特点是围绕流体分析精选一系列实例，所有实例均以图解方式进行讲解，使读者能够边学习边操练，更充分地享受阅读的乐趣和实用效果。随书附有一张光盘，读者可以通过观看录像的方式，学习各类有限元分析问题的方法。相当于老师在旁边手把手地指导，可起到事半功倍的效果。

本书由三维书屋工作室策划，军械工程学院的贾长治和胡仁喜主要编写，许洋、党沙沙、王义发、刘昌丽、王玉秋、张俊生、王佩楷、周冰、王培合、张日晶、王渊峰、董伟、王兵学、李瑞、王敏、王艳池、郑长松、王文平、路纯红、阳平华、康士廷、袁涛、李鹏、周广芬、卢园等为本书编写提供了大量帮助，在此深表感谢。

由于编者的经验和水平有限，书中缺点和错误在所难免，诚恳希望读者登录 www.sjzsanweishuwu.com 或联系 win760520@126.com 批评指正。

编　者

# 目 录

前言
第 1 章　FLOTRAN 流体力学分析概述 ........ 1
1.1　FLOTRAN CFD 分析的概念 ........ 2
1.2　FLOTRAN 分析类型 ........ 2
1.2.1 层流分析 ........ 2
1.2.2 湍流分析 ........ 3
1.2.3 热分析 ........ 3
1.2.4 可压缩流动分析 ........ 3
1.2.5 非牛顿流动分析 ........ 3
1.2.6 多组分传输分析 ........ 3
1.2.7 自由表面分析 ........ 3
第 2 章　FLOTRAN 分析的基本原理与基本属性 ........ 4
2.1　FLOTRAN 单元的特点 ........ 5
2.1.1 FLUID141 单元 ........ 5
2.1.2 FLUID142 单元 ........ 11
2.2　FLOTRAN 单元的局限性 ........ 15
2.3　FLOTRAN 分析步骤 ........ 17
2.3.1 确定问题的区域 ........ 17
2.3.2 确定流体的状态 ........ 17
2.3.3 生成有限元网格 ........ 17
2.3.4 施加边界条件 ........ 18
2.3.5 设置 FLOTRAN 分析参数 ........ 18
2.3.6 求解 ........ 18
2.3.7 检查结果 ........ 18
2.4　FLOTRAN 单元相关文件 ........ 18
2.4.1 结果文件 ........ 19
2.4.2 打印文件 ........ 19
2.4.3 残差文件 ........ 19
2.4.4 重启动文件 ........ 20
2.4.5 FLOTRAN 重启动分析（续算） ........ 20
2.5　提高收敛性和稳定性常用的工具 ........ 21
2.5.1 松弛因子 ........ 21
2.5.2 惯性松弛 ........ 21
2.5.3 修正的惯性松弛 ........ 21
2.5.4 人工粘性 ........ 22
2.5.5 速度限制 ........ 22

2.5.6 面积积分阶次 ........ 22
2.6 评价 FLOTRAN 分析 ........ 23
2.7 验证结果 ........ 23
2.8 流体基本属性 ........ 24
2.8.1 比热容 ........ 24
2.8.2 密度和导热系数 ........ 25
2.8.3 粘度 ........ 26
2.8.4 表面张力系数 ........ 27
2.8.5 壁面静态接触角 ........ 27
2.8.6 设置流体性质的步骤 ........ 28
2.9 初始属性和变化属性 ........ 30
2.10 使用 ANSYS 非牛顿流体性质 ........ 30
2.10.1 激活 Power Law 模型 ........ 30
2.10.2 激活 Carreau 模型 ........ 31
2.10.3 激活 Bingham 模型 ........ 31
2.11 用户编程定义属性 ........ 32
第 3 章 FLOTRAN 特性 ........ 33
3.1 坐标系 ........ 34
3.2 旋转参考系 ........ 35
3.3 涡流 ........ 35
3.4 分布式阻力 ........ 36
3.5 FLOTRAN 设置命令 ........ 37
3.5.1 FLOTRAN 求解控制命令 ........ 37
3.5.2 FLOTRAN 执行及输出控制命令——稳态控制参数设置 ........ 37
3.5.3 FLOTRAN 执行及输出控制命令——瞬态控制参数设置 ........ 38
3.5.4 FLOTRAN 输出及保存文件控制 ........ 40
3.5.5 FLOTRAN 输出收敛监测量的控制 ........ 42
3.5.6 FLOTRAN 流体类型及其特性的可变性控制 ........ 43
3.5.7 FLOTRAN 流体性质参数设定 ........ 44
3.5.8 FLOTRAN 分析的坐标系统的指定 ........ 45
3.5.9 FLOTRAN 分析参考条件的设置 ........ 46
3.5.10 指定 FLOTRAN 分析的旋转坐标系统 ........ 47
3.5.11 指定 FLOTRAN 分析的重力加速度 ........ 48
3.5.12 设置有助于 FLOTRAN 求解稳定的参数 ........ 48
3.5.13 设定 FLOTRAN 自由度松弛因子 ........ 49
3.5.14 设定 FLOTRAN 流体性质松弛因子 ........ 49
3.5.15 设置 FLOTRAN 分析的自由度限值 ........ 50
3.5.16 选择 FLOTRAN 各自由度相应的求解器 ........ 50
3.5.17 对 FLOTRAN 各求解器的控制 ........ 52

3.5.18 设置 FLOTRAN 湍流模型的一些常数 ........ 57
3.5.19 重新设定 FLOTRAN 各分析参数的值 ........ 58
3.5.20 控制 FLOTRAN 面积积分的阶次(Quadrature Order) ........ 59
3.5.21 FLOTRAN 多组分疏运分析的设置及控制 ........ 60
3.5.22 定义 FLOTRAN 的重启动（续算）控制 ........ 65
3.5.23 设置并执行一个零迭代 FLOTRAN 分析 ........ 67
第 4 章 FLOTRAN CFD 求解器和矩形方程 ........ 68
4.1 三对角矩阵算法 ........ 69
4.2 半直接求解 ........ 70
4.2.1 预条件广义最小残差（PGMR）求解器 ........ 71
4.2.2 预条件 BICGStab(PBCGM)求解器 ........ 71
4.3 稀疏直接求解 ........ 72
第 5 章 不可压缩流动 FLOTRAN 分析及实例 ........ 73
5.1 激活湍流模型 ........ 74
5.1.1 雷诺数 ........ 74
5.1.2 层流和湍流的判断 ........ 74
5.1.3 湍流比和入口参数 ........ 74
5.1.4 湍流模型 ........ 75
5.2 网格要求 ........ 77
5.3 流动边界条件 ........ 78
5.4 难点问题分析 ........ 81
5.5 问题描述 ........ 83
5.5.1 模型尺寸 ........ 83
5.5.2 理论假设 ........ 83
5.6 2-D 管道流动分析（层流模型） ........ 84
5.6.1 前处理 ........ 84
5.6.2 求解 ........ 89
5.6.3 后处理 ........ 91
5.6.4 命令流模式 ........ 94
5.7 2-D 管道流动分析（增加来流速的层流模型） ........ 98
5.7.1 前处理 ........ 98
5.7.2 求解过程 ........ 104
5.7.3 后处理 ........ 106
5.7.4 命令流模式 ........ 110
5.8 2-D 管道流动分析（增加出口段长度的层流模型） ........ 110
5.8.1 前处理 ........ 110
5.8.2 求解过程 ........ 116
5.8.3 后处理 ........ 117
5.8.4 命令流模式 ........ 120

5.9 2-D 管道湍流流动分析（增加出口段长度的湍流模型）........................................ 121
5.9.1 前处理 .......................................................................................................... 121
5.9.2 求解过程 ...................................................................................................... 126
5.9.3 后处理 .......................................................................................................... 128
5.9.4 命令流模式 .................................................................................................. 131
第 6 章 可压缩流动 FLOTRAN 分析及实例........................................................... 132
6.1 可压缩流动 FLOTRAN 分析简介......................................................................... 133
6.1.1 物理性质计算 .............................................................................................. 133
6.1.2 边界条件 ...................................................................................................... 134
6.1.3 结构和非结构网格 ...................................................................................... 135
6.1.4 求解方案 ...................................................................................................... 135
6.2 喷管内超音速可压缩流动分析 ............................................................................. 136
6.2.1 问题描述 ...................................................................................................... 136
6.2.2 前处理 .......................................................................................................... 136
6.2.3 求解 .............................................................................................................. 146
6.2.4 后处理 .......................................................................................................... 153
6.2.5 命令流模式 .................................................................................................. 154
第 7 章 VOF 模型分析及实例 .................................................................................. 155
7.1 VFRC 载荷............................................................................................................. 156
7.1.1 初始 VFRC 载荷 .......................................................................................... 156
7.1.2 建立 VFRC 载荷的边界 ............................................................................... 156
7.2 输入设置................................................................................................................. 157
7.2.1 外界条件 ...................................................................................................... 157
7.2.2 VFRC 公差 .................................................................................................... 158
7.2.3 VOF 时间步 .................................................................................................. 159
7.3 通过障碍物的水流流动初步发展分析 ................................................................. 159
7.3.1 问题描述 ...................................................................................................... 159
7.3.2 前处理 .......................................................................................................... 160
7.3.3 求解 .............................................................................................................. 173
7.3.4 后处理 .......................................................................................................... 176
7.3.5 命令流模式 .................................................................................................. 178
7.4 大坝 VOF 分析 ...................................................................................................... 178
7.4.1 问题描述 ...................................................................................................... 178
7.4.2 前处理 .......................................................................................................... 179
7.4.3 求解 .............................................................................................................. 185
7.4.4 后处理 .......................................................................................................... 187
7.4.5 命令流模式 .................................................................................................. 190
7.5 振荡液滴的 VOF 模型分析 .................................................................................. 190
7.5.1 问题描述 ...................................................................................................... 190

7.5.2 前处理 ........ 191
7.5.3 求解 ........ 197
7.5.4 后处理 ........ 199
7.5.5 命令流模式 ........ 201
第 8 章 FLOTRAN 热分析及实例 ........ 202
8.1 FLOTRAN 热分析简介 ........ 203
8.1.1 FLOTRAN 热分析的功能 ........ 203
8.1.2 FLOTRAN 热分析的基本要求 ........ 203
8.2 FLOTRAN 热分析求解 ........ 205
8.2.1 FLOTRAN 热分析的求解内容 ........ 205
8.2.2 FLOTRAN 热分析方法 ........ 205
8.2.3 FLOTRAN 热分析的基本步骤 ........ 206
8.3 求解方法 ........ 207
8.3.1 连续流体性质 ........ 207
8.3.2 强制对流 ........ 208
8.3.3 自然对流 ........ 208
8.3.4 共轭传热 ........ 209
8.4 层流流体受均匀壁面热通量 ........ 210
8.4.1 问题描述 ........ 210
8.4.2 前处理 ........ 211
8.4.3 求解 ........ 219
8.4.4 后处理 ........ 222
8.4.5 命令流模式 ........ 228
8.5 空腔中空气的热稳态层流分析 ........ 228
8.5.1 问题描述 ........ 228
8.5.2 前处理 ........ 228
8.5.3 求解 ........ 234
8.5.4 后处理 ........ 236
8.5.5 命令流模式 ........ 240
第 9 章 动网格的 ALE 分析及实例 ........ 241
9.1 ALE 方法简介 ........ 242
9.2 对称扭转 ALE 分析 ........ 243
9.2.1 问题描述 ........ 243
9.2.2 前处理 ........ 245
9.2.3 求解 ........ 255
9.2.4 后处理 ........ 257
9.2.5 命令流模式 ........ 259
9.3 容积可变式容器的 ALE/VOF 分析 ........ 259
9.3.1 问题描述 ........ 259

9.3.2 前处理 ........ 260
9.3.3 求解 ........ 268
9.3.4 后处理 ........ 270
9.3.5 命令流模式 ........ 272
9.4 动圆柱的 ALE 分析 ........ 272
9.4.1 问题描述 ........ 272
9.4.2 前处理 ........ 272
9.4.3 求解 ........ 283
9.4.4 后处理 ........ 287
9.4.5 命令流模式 ........ 289
9.4.6 思考与讨论 ........ 289
第 10 章 多组分传输分析及实例 ........ 291
10.1 混合类型 ........ 292
10.2 多组分传输分析的基本步骤 ........ 293
10.3 两相热交换分析及实例 ........ 295
10.3.1 问题描述 ........ 295
10.3.2 前处理 ........ 295
10.3.3 求解 ........ 305
10.3.4 后处理 ........ 311
10.3.5 命令流模式 ........ 313
10.4 三种气体混合分析及实例 ........ 313
10.4.1 问题描述 ........ 313
10.4.2 前处理 ........ 314
10.4.3 求解 ........ 325
10.4.4 二次前处理 ........ 326
10.4.5 二次求解 ........ 335
10.4.6 后处理 ........ 338
10.4.7 命令流模式 ........ 341
第 11 章 声学分析及实例 ........ 342
11.1 声学分析步骤 ........ 343
11.1.1 建立模型 ........ 343
11.1.2 划分网格 ........ 344
11.1.3 设置边界条件并计算 ........ 345
11.2 流固耦合声学分析 ........ 348
11.2.1 问题描述 ........ 348
11.2.2 前处理 ........ 348
11.2.3 求解 ........ 359
11.2.4 后处理 ........ 361
11.2.5 命令流模式 ........ 365

11.3 房间内的声学分析 ........ 365
11.3.1 问题描述 ........ 365
11.3.2 前处理 ........ 365
11.3.3 求解 ........ 379
11.3.4 后处理 ........ 380
11.3.5 命令流模式 ........ 381

# 第 1 章

# FLOTRAN 流体分析概述

本章主要介绍了 FLOTRAN 流体分析的基本概念和分析类型。

分析类型主要有层流分析、湍流分析、热分析、可压缩流动分析、非牛顿流动分析、多组分传输分析、自由表面分析。

学 习 要 点

- 了解 FLOTRAN 流体分析的基本概念
- 了解 FLOTRAN 分析类型

# 1.1 FLOTRAN CFD 分析的概念

ANSYS 程序中的 FLOTRAN CFD 分析功能是一个用于分析二维及三维流体流动场的先进工具。使用 ANSYS 中用于 FLOTRAN CFD 分析的 FLUID 141 和 FLUID 142 单元，可解决如下问题：

1）作用于气动翼（叶）型上的升力和阻力；

2）超音速喷管中的流场；

3）弯管中流体的复杂的三维流动。

同时，FLOTRAN 还具有如下功能：

1）计算发动机排气系统中气体的压力及温度分布；

2）研究管路系统中热的层化及分离；

3）使用混合流研究来估计热冲击的可能性；

4）用自然对流分析来估计电子封装芯片的热性能；

5）对含有多种流体（由固体隔开）的热交换器进行研究。

# 1.2 FLOTRAN 分析类型

1）层流分析；

2）湍流分析；

3）热分析；

4）可压缩流动分析；

5）非牛顿流动分析；

6）多组分传输分析；

7）自由表面分析。

这些分析类型并不相互排斥，例如，一个层流分析可以是传热的或者是绝热的，一个湍流分析可以是可压缩的或者是不可压缩的。

## 1.2.1 层流分析

层流流动就是流体层与层之间相互没有干扰，层与层之间既没有质量的传递也没有动量的传递。判断流动是否是层流，应看其雷诺数是否超过临界雷诺数。雷诺数的定义如下：

$$Re = \frac{VL}{\nu} \tag{1-1}$$

式中，$V$ 为截面处流体的平均速度；$L$ 为特征长度；$\nu$ 为流体的运动粘度。

对于圆形管内流动，特征长度 $L$ 取圆管的直径 $d$。一般认为临界雷诺数为 2320，即：当 $Re<2320$ 时，管中是层流。

层流中的速度场都是平滑而有序的，高粘性流体（如石油等）的低速流动通常就是

层流。

### 1.2.2 湍流分析

湍流流动就是层与层之间相互干扰，而且干扰的力度还会随着流动而加大，层与层之间既有质量的传递也有动量的传递。判断流动是否是湍流，应看其雷诺数是否超过临界雷诺数。

对于圆形管内流动，一般认为临界雷诺数为 2320，即：当 *Re*>2320 时，管中是湍流。

湍流分析用于处理那些由于流速足够高和粘性足够低从而引起湍流波动的流体流动情况，ANSYS 中的二方程湍流模型考虑了在平均流动下的湍流速度波动的影响。如果流体的密度在流动过程中保持不变或者当流体压缩时只消耗很少的能量，则该流体就可认为是不可压缩的。不可压缩流体的温度方程将忽略流体动能的变化和粘性耗散。

### 1.2.3 热分析

流体分析中通常还会求解流场中的温度分布情况。如果流体性质不随温度而变，就可不求解温度方程。在共轭传热问题中，要在同时包含流体区域和非流体区域（即固体区域）的整个区域上求解温度方程。在自然对流传热问题中，流体由于温度分布的不均匀性而导致流体密度分布的不均匀性，从而引起流体的流动，与强迫对流问题不同的是，自然对流通常都没有外部的流动源。

### 1.2.4 可压缩流动分析

对于高速气流，由很强的压力梯度引起的流体密度的变化将显著地影响流场的性质，ANSYS 对于这种流动情况会使用不同的解算方法。

### 1.2.5 非牛顿流动分析

应力与应变率之间成线性关系的理论并不能足以解释所有流体的流动。对于非牛顿流体，ANSYS 程序提供了三种粘性模式和一个用户自定义子程序。

### 1.2.6 多组分传输分析

这种分析通常是用于研究有毒流体物质的稀释或大气中污染气体的传播情况，同时，它也可用于研究有多种流体同时存在（但被固体相互隔开）的热交换分析。

### 1.2.7 自由表面分析

自由表面分析可以求解无约束气液表面问题，可以解决二维平面和轴对称问题。

# 第 2 章

# FLOTRAN 分析的基本原理与基本属性

在进行 FLOTRAN 分析之前，需要了解 FLOTRAN 单元类型、FLOTRAN 分析步骤、FLOTRAN 分析工具，以及如何进行分析评价。

本章主要介绍了 FLOTRAN 流体的基本原理及基本属性、初始属性和变化属性，以及用户编程定义属性。

学 习 要 点

- 了解 FLOTRAN 单元特点
- 理解 FLOTRAN 分析步骤
- 了解 FLOTRAN 分析步骤，以及如何进行分析评价
- 了解 FLOTRAN 流体的基本属性
- 了解 FLOTRAN 流体初始属性和变化属性

# 2.1 FLOTRAN 单元的特点

ANSYS 中的 FLOTRAN 单元，即 FLUID141 和 FLUID142，用于解算单相粘性流体的二维和三维流动、压力和温度分布。对于这些单元，ANSYS 通过质量、动量和能量三个守恒定律来计算流体的速度分量、压力及温度。下面介绍 FLUID141 和 FLUID142 单元。

## 2.1.1 FLUID141 单元

1．FLUID141 单元特征

维　数：二维。

形　状：四节点四边形或三节点三角形。

自由度：速度、压力、温度、湍流动能、湍流能量耗散、多达 6 种流体的各自质量所占的份额。

2．FLUID141 单元描述

FLUID141 可以用来建立包括流体和（或）非流体区域的瞬态或稳态流体、热系统的模型。在流体区域求解粘性流体流动和能量守恒方程，而在非流体区域只能求解能量方程。用这个 FLOTRAN CFD 单元可求解一个区域内的流动和温度分布。在一个流体固体耦合系统中也可以使用 FLUID141。在 *Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench* 中可以看到关于 FLUID141 的更多细节。

对于 FLOTRAN CFD 单元，根据动量守恒原理可以得到速度，根据质量守恒原理可以得到压力（如果需要的话，可根据能量守恒原理得到温度）。使用分离顺序求解运算法则，即分别求解根据对每个自由度控制方程的有限元离散得到的矩阵系统。流动问题时非线性的，且控制方程耦合在一起。与任意依赖于温度或压力的性质的校正联系在一起，所有控制方程的顺序求解构成了整体迭代。依赖于问题的尺寸和稳定性，需要得到收敛解的整体迭代数可能会适当地变化。

在一个以恒定角速度旋转的坐标系中可以求解方程。自由度为速度、压力和温度。如果使用一个任意的湍流模型，可以计算两个湍流量：湍流动能和湍流能量耗散率。对于轴对称模型，可以计算垂直于平面的一个任意的涡旋速度 VZ。在入口处或一个边界（移动壁面）上也可以得到涡旋。

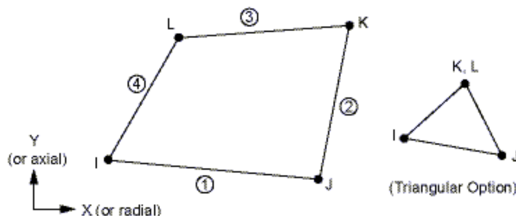



图 2-1 FLUID141 的几何形状

图 2-1 所示为 FLUID141 的几何形状、节点位置和坐标系。可以通过三个节点（三角形）或四个节点（四边形）及均匀的材料性质定义单元。根据 KEYOPT(3)的值选择坐标系，而坐标系可以是笛卡尔坐标系，轴对称坐标系或极坐标系。

节点和单元载荷描述了单元载荷。对于流体固体交互分析，使用命令 SF 系列（SF，SFA、SFE 或 SFL）和 FSIN 表面载荷标签来施加流体固体交互标记。在发生载荷传递的固体分界面处也必须施加相同的分界面数。

（1）FLUID141 流体单元　若一个 FLUID141 单元的材料数为 1，就假设此单元为一个流体单元。其密度、粘度、导热系数和比热容可通过一系列 FLDATA 命令来定义。只能分析一种流体，且流体必须处在单相中。仅当问题在本质上为热问题时，导热系数和比热容才是相关的（及必需的）。通过由“FLDATA7，PRO”命令确定的关系或者通过一个性质数据库（文件 floprp.ans），性质可以是温度的函数。除此之外，如果流体为空气或某种气体，其密度可能随压力变化（由理想气体定理）。

可以使用 6 个湍流模型。用“FLDATA1,SOLU,TURB,T”命令激活湍流模型。沿着标准 k-ε 模型的 4 个延展方向可以使用标准 k-ε 模型和零方程湍流模型 KEYOPT(1)激活“multiple species transport”，这使得在主流体中能够追踪多达 6 种不同流体（种类）的输送。当使用任意拉格朗日-欧拉方程时，KEYOPT(4)能够使用位移自由度来确定边界的运动。如表 2-1 所示，当且仅当一个分布阻力(FLUID141 分布阻力)、一个风扇模型(FLUID141 风扇模型)、一个壁面粗糙度（FLUID141 壁的表面粗糙度）或一个 ALE 公式包括在内时，实常数才是必需的。

（2）FLUID141 分布阻力　分布阻力提供了一种便利的方法来估计多孔介质效应或者其他实际上没有建立那些特征的几何形状模型的流动区域特征效应。这种效应是一种人为施加的、与没有明确建模的几何形状有关的不可恢复的损失。任一具有分布阻力的流体单元都有一个比赋值 1 大得多的实常数[REAL]。

（3）FLUID141 风扇模型　风扇模型提供了一个便利的方法来估计流动区域的风扇或泵效应。此效应为人为施加的动量源，它提供了与没有明确建模的风扇或泵相关的动量源。通过压力梯度乘以沿具有风扇模型实常数的单元的流动长度给定了与风扇模型相关的压力增长。对于一个一维风扇模型（实常数 TYPE=4），输入三个系数。对于 X 方向如下所示，压力梯度可视为速度的二次方程。

$$\frac{\partial p}{\partial x}_{fan} = C_1 + C_2\left|V_x\right| + C_3 V_x^2$$

式中，$V$ 为流体速度；$C_1$、$C_2$ 和 $C_3$ 为常数。对于一个任意方向的风扇模型（实常数 TYPE=5），三个系数为实际系数沿坐标方向的分量。

（4）FLUID141 非流体单元　如果单元的材料数[MAT]大于 1，可以假定该单元为非流体单元。在非流体单元中只能求解能量方程。可以定义多达 100 个不同的非流体材料。为了确定非流体单元的密度、比热容和导热系数，可使用 MP 命令。

非流体性质的温度变化是允许的，并可由 MP 或 MPDATA 确定。正交各向异性变化也是允许的，但是有限制，即空间上的变化总是与球坐标系有关。值得注意的是，对于非流体 FLUID141 单元，单元实常数没有意义。

表 2-1 FLUID141 实常数

| 编号 | 名称 | 定义和类型编号 | 量纲 |
|---|---|---|---|
| 1 | 分布阻力或风扇模型的类型 | 1—分布阻力：等方性的 | — |
| | | 2—分布阻力：一维 | — |
| | | 3—分布阻力：依赖于方向 | — |
| | | 4—风扇模型：与坐标轴相关 | — |
| | | 5—风扇模型：任意方向 | — |
| 2 | （空白） | 1,2,3—不使用 | — |
| | DIR | 4—风扇方向：1 = X,2 = Y,3 = Z | — |
| | （空白） | 5—不使用 | — |
| 3 | K | 1,2—无量纲压头损失/长度 | 1/L |
| | $K_x$ | 3—X 方向的压头损失 | 1/L |
| | $C_1$ | 4—常数项 | $M/L^2t^2$ |
| | $C_{1x}$ | 5—X 方向 $C_1$ 的矢量分量 | $M/L^2t^2$ |
| 4 | C | 1,2—渗透性 | $1/L^2$ |
| | $C_x$ | 3—X 方向的渗透性 | $1/L^2$ |
| | $C_2$ | 4—线性系数 | $M/L^3t$ |
| | $C_{2x}$ | 5—X 方向 $C_2$ 的矢量分量 | $M/L^3t$ |
| 5 | $D_h$ | 1,2—水力直径 | L |
| | $D_{hx}$ | 3—X 方向的水力直径 | L |
| | $C_3$ | 4—二次系数 | $M/L^4$ |
| | $C_{3x}$ | 5—X 方向 $C_3$ 的矢量分量 | $M/L^4$ |
| 6 | a | 1,2—计算摩擦系数时使用的雷诺数的系数 | — |
| | $a_x$ | 3—X 方向的系数 a | — |
| | （空白） | 4,5—不使用 | — |
| 7 | b | 1,2—计算摩擦系数时使用的雷诺数的指数 | — |
| | $b_x$ | 3—X 方向的指数 b | — |
| | （空白） | 4,5—不使用 | — |
| 8 | （空白） | 1—不使用 | — |
| | FLDIR | 2—流动方向，1=X,2=Y,3=Z | — |
| | $K_y$ | 3—Y 方向的压头损失 | 1/L |
| | （空白） | 4—不使用 | — |
| | $C_{1y}$ | 5—Y 方向 $C_1$ 的矢量分量 | $M/L^2t^2$ |
| 9 | （空白） | 1,2—不使用 | — |
| | $C_y$ | 3—Y 方向的渗透性 | $1/L^2$ |
| | （空白） | 4—不使用 | — |
| | $C_{2y}$ | 5—Y 方向 $C_2$ 的矢量分量 | $M/L^3t$ |

（续）

| 编号 | 名称 | 定义和类型编号 | 单位 |
|---|---|---|---|
| 10 | (空白) | 1,2—不使用 | — |
| | $D_{hy}$ | 3—Y 方向的水力直径 | L |
| | (空白) | 4—不使用 | — |
| | $C_{3y}$ | 5—Y 方向 $C_3$ 的矢量分量 | $M/L^4$ |
| 11 | (空白) | 1,2—不使用 | — |
| | $a_y$ | 3—Y 方向上雷诺数的系数 | — |
| | (空白) | 4,5—不使用 | — |
| 12 | $b_y$ | 3—Y 方向上雷诺数的指数 | — |
| | (空白) | 4,5—不使用 | — |
| 13 | (空白) | 1,2—不使用 | — |
| | $K_z$ | 3—Z(涡旋)方向上的压头损失 | 1/L |
| | (空白) | 4—不使用 | — |
| | $C_{1z}$ | 5—Z(涡旋)方向上 $C_1$ 的矢量分量 | $M/L^2t^2$ |
| 14 | (空白) | 1,2—不使用 | — |
| | | 3—Z(涡旋)方向上的渗透性 | $1/L^2$ |
| | | 4—不使用 | — |
| | | 5—Z(涡旋)方向上 $C_2$ 的矢量分量 | $M/L^3t$ |
| 15 | | 1,2—不使用 | — |
| | | 3—Z(涡旋)方向上的水力直径 | L |
| | | 4—不使用 | — |
| | | 5—Z(涡旋)方向上 $C_3$ 的矢量分量 | $M/L^4$ |
| 16 | | 1,2—不使用 | — |
| | | 3—Z(涡旋)方向上雷诺数的系数 | — |
| | | 4,5—不使用 | — |
| 17 | | 1,2—不使用 | — |
| | | 3—Z(涡旋)方向上雷诺数的指数 | — |
| | | 4,5—不使用 | — |
| 18 | | 单元出生/死亡公差 | L |
| 19 | | 网格变形倍增器 | — |
| 20 | $K_s$ | 局部均匀壁面粗糙度 | L |
| 21 | $CK_s$ | 表示壁面不均匀度 0.5～1.0 之间的一个经验无量纲系数 | — |

3．FLUID141 输出数据

与单元相关的解输出表现为节点数的形式。附加的中间性质和得到的数量补充了自由度。

表 2-2 描述了一个节点基上输出的量。如果相关的选项没有激活，一些数就不会输

出。一旦使用了一个选项，相关的自由度数量就会储存起来。例如，如果已经得到了温度场，并且在重启动时不再求解能量方程，那么无论如何温度都会储存起来。通过使用“FLDATA5,OUTP”命令来控制获得的诸如有效粘度等的性质的存储。

表 2-2 FLUID141 单元输出定义

| 名称 | 定义 | R |
|---|---|---|
| UX | X 方向的位移(笛卡尔坐标)；沿对称轴的位移(关于 X 轴对称)；径向位移 (关于 Y 轴对称) | 10 |
| UY | Y 方向的位移(笛卡尔坐标)；径向位移(关于 X 轴对称)；沿对称轴的位移 (关于 Y 轴对称) | 10 |
| VX | X 方向的速度(笛卡尔坐标)；径向速度（极坐标）；沿对称轴的速度(关于 X 轴对称)；径向速度（关于 Y 轴对称） | Y |
| VY | Y 方向的速度(笛卡尔坐标)；切向速度（极坐标）；径向速度(关于 X 轴对称)；沿对称轴的速度（关于 Y 轴对称） | Y |
| VZ | 涡旋方向的速度（轴对称问题） | 8 |
| PRES | 相对压力 | Y |
| ENKE | 湍流动能 | 2 |
| ENDS | 湍流耗散率 | 2 |
| TEMP | 温度 | 1 |
| DENS | 节点流体密度 | 8 |
| VISC | 节点流体粘度 | 8 |
| COND | 节点流体导热系数 | 8 |
| SPHT | 节点流体比热容 | 8 |
| EVIS | 有效粘度（包括湍流效应） | 8 |
| ECON | 有效导热系数（包括湍流效应） | 2 |
| CMUV | 湍动粘度系数 | 2 |
| TTOT | 停滞（总）温度(仅与可压缩分析相关) | 7 |
| HFLU | 外表面节点的热通量 (每单位面积) | 1 |
| HFLM | 外表面节点的传热系数 | 1 |
| RDFL | 辐射热通量 | 1 |
| STRM | 流量函数(二维) | Y |
| MACH | 马赫数(若不可压缩时则是必需的) | 6 |
| PTOT | 停滞（总）压力 | Y |
| PCOE | 压力系数 | 3 |
| YPLU | Y+壁面参数的一个湍流定理 | 3 |
| TAUW | 壁面处的切应力 | 3 |
| SP0 *N* | 组分 *N* 的质量分数,此时 *N* =1～6 (FLOTRAN)。如果给了组分一个自定义名字 [MSSPEC], 就使用那个名字而不是使用 SP0*N* | 4 |
| LMD *N* | 组分 *N* 的线性质量扩散率,此时 *N* =1～6(除非组分已经定义，否则就不相关) | 3 |
| EMD *N* | 组分 *N* 的有效质量扩散系数,此时 *N* =1～6(除非组分已经定义，否则就不相关) | 2 |

Jobname.PFL 文件提供了另一种输出。文件中包含了最大值和最小值的周期性表格，以及速度、压力、温度、湍流量和性质的平均值。同时文件也记录了每一整体迭代计算得到的收敛检测参数。Jobname.PFL 还把进出口处的质量流量和所有边界上的传热信息制成了表格。

壁面结果文件(Jobname.RSW)包含了与壁面单元的边界面相关的信息。平均压力、温度、切应力、正的 Y 值及壁面热通量，连同垂直于表面方向的矢量（法向矢量）和紧

邻壁面的速度方向的矢量（切矢量）都被储存起来。一个可选择的残余文件(Jobname.RDF)表明了目前的解是如何满足每个自由度的默认的矩阵方程。

单元输出定义表格使用了以下的符号：

名称栏中的冒号(:)表明能够通过组分名称方法[ETABLE, ESOL]获得该项。R 栏表明在结果文件中可应用该项。

R 栏中的 Y 表明该项总是可用的，一个数字引用了一个表格脚注，这描述了什么时候该项是有条件地使用。

4．FLUID141 假设和限制

●单元必须没有任何负面积或零面积。

●必须按逆时针的顺序定义一个单元和节点的联系。

●单元必须位于 XY 平面内。

●通过重复第三个节点形成三角形时，FLOTRAN 单元将会忽略重复的节点并把节点视为 I、J 和 K。

●只支持线性单元。

●不能和任一其他的 ANSYS 单元一起使用 FLUID141。

●并不是所有的 ANSYS 单元都和 FLUID141 的使用相关。

●FLOTRAN CFD 分析是高度非线性的。

●在某些情况下，收敛很难得到，并且需要使用稳定性和松弛参数。

●高度湍流情况可能有利于预处理（一个线性分析的流场的初始化），尤其是当使用粗糙有限元网格时。

●必须确定是否保证使用了湍流及(或)压缩选项。湍流选项要求壁面附近的网格精细，并且在冲击波出现的任何区域推荐使用精细网格。如果粗糙网格区域内出现较大的梯度，就要在调整网格后再进行运算。

●对于可压缩流动热分析及 R-θ 和 R-θ-Z 坐标系，不支持面对面的辐射（RDSF）。

●对于一个二维 FSI 分析，FLOTRAN 单元必须是按逆时针顺序排列的。对于一个二维 FSI 分析，必须是按正体积顺序排列的。如果单元顺序不恰当，就需要重新调整网格。

在公式中作出了以下假设：

●节点坐标系和球坐标系必须保持相同。

●在分析中不能改变问题区域和有限元网格。

●流体为单相流体。

●非流体的导热系数可以随温度而变化。也支持非流体导热系数的正交各向异性变化。

●不允许出现自由表面。

●气体的状态方程符合理想气体定理，这种情况不管是否使用了可压缩或不可压缩运算法则。当马赫数大于 5 时，理想气体定理是无效的。

●在不可压缩选项中，压力作用在流体上的功、粘性耗散和动能项在能量方程中是可以忽略不计的。不可压缩方程是一个热输送方程。

●在可压缩绝热情况下，假设停滞（总）温度是恒定的，并通过减去一个动能项从中计算出静态温度。

●FLOTRAN 单元不允许在载荷情况下操作。

## 2.1.2 FLUID142 单元

1．FLUID142 单元特征

维数：三维.

形状：四节点四面体或八节点六面体。

自由度：速度、压力、温度、湍流动能、湍流能量耗散、多达 6 种流体的各自质量所占的份额。

2．FLUID142 单元描述（同 2.1.1 节 FLUID141 单元描述）

3．FLUID142 输入数据

图 2-2“FLUID142 几何形状”显示了此单元的几何形状、节点位置和坐标系。通过 8 个节点和材料性质定义单元。通过对节点 M、N、O 和 P 定义相同的节点数可形成一个四面体形状的单元，也可以形成一个楔形单元和一个棱锥形单元。根据 KEYOPT(3) 的值选择的坐标系可以是笛卡尔坐标系，也可以是柱坐标系。

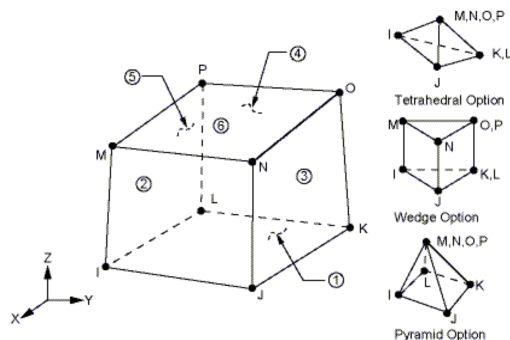



图 2-2 FLUID142 几何形状

节点和单元载荷描述了单元载荷。对于一个流体-固体交互分析，可以使用 SF 系列命令（SF、SFA、SFE 或 SFL）和 FSIN 表面载荷标签来应用流体-固体交互标记，也必须在载荷传递发生的固体交界面处应用相同的交界面数。

1）FLUID142 流体单元（同 2.1.1 节 FLUID141 流体单元）。仅当包括一个分布阻力（FLUID142 分布阻力）、一个风扇模型（FLUID142 风扇模型）、一个壁面粗糙度（FLUID142 壁面粗糙度）或一个 ALE 公式在内时，才需要常数，见表 2-3。

2）FLUID142 分布阻力。为了估计多空介质(例如过滤器)效应或其他实际上没有建立那些特征的几何形状模型的流动区域特征效应，分布阻力是一种便利的方法。分布阻力是一个人为施加的、与没有明确建模的几何形状相关的不可恢复的损失。具有分布阻力的任何一个流体单元都有一个大于 1 的实常数。

流动的阻力被建模成一个分布阻力，可归因于这些因数中的一个或一个组合：局部

压头损失（K），摩擦系数（f）或渗透性（C）。总压梯度为这三个项之和，对于 X 方向公式参见 FLUID141 分布阻力。

表 2-3 FLUID142 实常数

| 编号 | 名称 | 定义和类型编号 | 量纲 |
|---|---|---|---|
| 1 | 分布阻力或风扇模型的类型 | 1—分布阻力：等方性的 | |
| | | 2—分布阻力：一维的 | — |
| | | 3—分布阻力：依赖于方向的 | — |
| | | 4—风扇模型：与坐标轴相关 | — |
| | | 5—风扇模型：任意方向 | — |
| 2 | (空白) | 1,2,3—不使用 | — |
| | DIR | 4—风扇方向：1=X,2=Y,3=Z | — |
| | (空白) | 5—不使用 | — |
| 3 | K | 1，2—无量纲压头损失/长度 | 1/L |
| | $K_x$ | 3—X 方向的压头损失 | 1/L |
| | $C_1$ | 4—常数项 | $M/L^2t^2$ |
| | $C_{1x}$ | 5—X 方向 $C_1$ 的矢量分量 | $M/L^2t^2$ |
| 4 | C | 1，2—渗透性 | $1/L^2$ |
| | $C_x$ | 3—X 方向的渗透性 | $1/L^2$ |
| | $C_2$ | 4—线性系数 | $M/L^3t$ |
| | $C_{2x}$ | 5—X 方向 $C_2$ 的矢量分量 | $M/L^3t$ |
| 5 | $D_h$ | 1，2—水力直径 | L |
| | $D_{hx}$ | 3—X 方向的水力直径 | L |
| | $C_3$ | 4—二次系数 | $M/L^4$ |
| | $C_{3x}$ | 5—X 方向 $C_3$ 的矢量分量 | $M/L^4$ |
| 6 | a | 1，2—计算摩擦系数时使用的雷诺数的系数 | — |
| | $a_x$ | 3—X 方向的系数 a | — |
| | (空白) | 4，5—不使用 | — |
| 7 | b | 1，2—计算摩擦系数时使用的雷诺数的指数 | — |
| | $b_x$ | 3—X 方向的指数 b | — |
| | (空白) | 4，5—不使用 | — |
| 8 | (空白) | 1—不使用 | — |
| | FLDIR | 2—流动方向 1=X,2=Y,3=Z | — |
| | $K_y$ | 3—Y 方向的压头损失 | 1/L |
| | (空白) | 4—不使用 | — |
| | $C_{1y}$ | 5—Y 方向 $C_1$ 的矢量分量 | $M/L^2t^2$ |
| 9 | (空白) | 1，2—不使用 | — |
| | $C_y$ | 3— Y 方向的渗透性 | $1/L^2$ |
| | (空白) | 4—不使用 | — |
| | $C_{2y}$ | 5—Y 方向 $C_2$ 的矢量分量 | $M/L^3t$ |
| 10 | (空白) | 1，2—不使用 | — |
| | $D_{hy}$ | 3—Y 方向的水力直径 | L |
| | (空白) | 4—不使用 | — |
| | $C_{3y}$ | 5—Y 方向 $C_3$ 的矢量分量 | $M/L^4$ |
| 11 | (空白) | 1，2—不使用 | — |
| | $a_y$ | 3—Y 方向上雷诺数的系数 | — |
| | (空白) | 4，5—不使用 | — |

（续）

| 编号 | 名称 | 定义和类型编号 | 量纲 |
| --- | --- | --- | --- |
| 12 | (空白) | 1，2—不使用 | — |
| | $b_y$ | 3—Y 方向上雷诺数的指数 | — |
| | (空白) | 4，5—不使用 | — |
| 13 | (空白) | 1，2—不使用 | — |
| | $K_z$ | 3—Z(涡旋)方向上的压头损失 | 1/L |
| | (空白) | 4—不使用 | — |
| | $C_{1z}$ | 5—Z(涡旋)方向上 $C_1$ 的矢量分量 | $M/L^2t^2$ |
| 14 | (空白) | 1，2—不使用 | — |
| | $C_z$ | 3—Z(涡旋)方向上的渗透性 | $1/L^2$ |
| | (空白) | 4—不使用 | — |
| | $C_{2z}$ | 5—Z(涡旋)方向上 $C_2$ 的矢量分量 | $M/L^3t$ |
| 15 | (空白) | 1，2—不使用 | — |
| | $D_{hz}$ | 3—Z(涡旋)方向上的水力直径 | L |
| | (空白) | 4—不使用 | — |
| | $C_{3z}$ | 5—Z(涡旋)方向上 $C_3$ 的矢量分量 | $M/L^4$ |
| 16 | 空白) | 1，2—不使用 | — |
| | $a_z$ | 3—Z(涡旋)方向上雷诺数的系数 | — |
| | (空白) | 4，5—不使用 | — |
| 17 | (空白) | 1，2—不使用 | — |
| | $b_z$ | 3—Z(涡旋)方向上雷诺数的指数 | — |
| | (空白) | 4，5—不使用 | — |
| 18 | BDTOL | 单元出生/死亡公差 | L |
| 19 | MMFAC | 网格变形倍增器 | — |
| 20 | $K_s$ | 局部均匀壁面粗糙度 | L |
| 21 | $CK_s$ | 表示壁面不均匀度在 0.5～1.0 之间的一个经验无量纲系数 | — |

为了计算粘度，ANSYS 提供了一个自定义子程序。

如果分布阻力区域内部速度场中存在大的速度梯度，通过在此区域内设 ENKE DOF 为 0，设 ENDS DOF 为 1 来使湍流模型无效。

3）FLUID142 风扇模型（同 2.1.1 节 FLUID141 风扇模型）。

4）FLUID142 非流体单元（同 2.1.1 节 FLUID141 非流体单元）。

4．FLUID142 输出数据（同 2.1.1 节 FLUID141 输出数据）

与单元相关的解输出表现为节点数的形式。附加的中间性质和得到的数量补充了自由度

表 2-4 描述了一个节点基上输出的量，意义与表 2-2 相同。

5．FLUID142 假设和限制

●单元必须没有任何负体积或零体积。

●必须定义单元的连通性，以使与前四个节点（六面体单元）或前三个节点（四面体单元）相关的由右手准则定义的法线指向单元。

●通过确定复制的节点形成四面体时，FLOTRAN 单元就会忽略重复的节点，并且使几何图形基于节点 I、J、K 和 M 上。

表 2-4 FLUID142 单元输出定义

| 名称 | 定义 | R |
|---|---|---|
| UX | X 方向的位移(笛卡尔坐标) | 9 |
| UY | Y 方向的位移(笛卡尔坐标) | 9 |
| UZ | Z 方向的位移(笛卡尔坐标) | 9 |
| VX | X 方向的速度(笛卡尔坐标);径向速度（柱坐标） | Y |
| VY | Y 方向的速度(笛卡尔坐标);切向速度（柱坐标） | Y |
| VZ | Z 方向的速度(笛卡尔坐标);轴向速度（柱坐标） | Y |
| PRES | 相当压力 | Y |
| ENKE | 湍流动能 | 2 |
| ENDS | 湍流耗散率 | 2 |
| TEMP | 温度 | 1 |
| DENS | 节点流体密度 | 8 |
| VISC | 节点流体粘度 | 8 |
| COND | 节点流体导热系数 | 8 |
| SPHT | 节点流体比热容 | 8 |
| EVIS | 有效粘度（包括湍流效应） | 8 |
| ECON | 有效导热系数（包括湍流效应） | 2 |
| CMUV | 湍动粘度系数 | 2 |
| TTOT | 停滞（总）温度(仅与可压缩分析相关) | 7 |
| HFLU | 外表面节点的热通量(每单位面积) | 1 |
| HFLM | 外表面节点的传热（薄膜）系数 | 1 |
| MACH | 马赫数(若不可压缩时则是必需的) | 6 |
| PTOT | 停滞（总）压力 | Y |
| PCOE | 压力系数 | 3 |
| YPLU | Y+壁面参数的一个湍流定理 | 3 |
| TAUW | 壁面处的切应力 | 3 |
| SP0 *N* | 组分 *N* 的质量分率，此时 *N* = 1～6 (FLOTRAN)。如果给了组分一个自定义名字［MSSPEC］，就使用那个名字而不是使用 SP0 *N*。 | 4 |
| LMD *N* | 组分 *N* 的线性质量扩散率，此时 *N* = 1～6(只有组分定义才相关) | 3 |
| EMD *N* | 组分 *N* 的有效质量扩散系数，此时 *N* = 1～6(只有组分定义才相关) | 2 |

●只支持线性单元。

●不能和任一其他 ANSYS 单元一起使用 FLUID142。

●并不是所有的 ANSYS 命令都和 FLUID142 的使用相关。

●FLOTRAN CFD 分析是高度非线性的。

●在某些情况下，收敛很难达到，并且要求使用稳定性和松弛参数。

●高度湍流情况可能会受益于预处理（一个线性分析的流场的初始化），尤其是当使用粗糙有限元网格时。

●必须确定能否保证使用湍流及（或）可压缩选项。湍流选项要求壁面附近为细化的网格，并且在冲击波发生的任一区域附近推荐使用细化的网格。如果在粗糙网格区域存在较大的梯度，就要调整网格后再进行运算。

●对于一个流动分析，尤其是湍流，由于在求解过程中会产生错误，不应该在壁面附近使用棱锥型单元。

●对于可压缩流动热分析及 R-θ 和 R-θ-Z 坐标系，不支持面对面的辐射（RDSF）。

●对于一个二维 FSI 分析，FLOTRAN 单元必须是按逆时针排序。对于一个二维 FSI 分析，单元必须按正体积排序。如果单元顺序不恰当，就需要重新建立网格。

在公式中作了以下假设：

●节点坐标系和球坐标系必须保持相同。

●在分析过程中，不能改变问题区域和有限元网格。

●流体为单相流体。

●非流体的导热系数可随温度而变化。也支持非流体导热系数的正交各向异性变化。

●不允许出现自由表面。

●气体的状态方程遵循理想气体定理，这种情况没有考虑是否使用了不可压缩或可压缩运算法则。当马赫数大于 5 时，理想气体定理是无效的。

●在不可压缩选项中，压力作用在流体上的功、粘性耗散及动能项在能量方程中是忽略不计的。不可压缩能力方程是一个热输送方程。

●在可压缩绝热情况下，假定停滞（总）温度是恒定的，并通过减去一个动能项从中计算出静态温度。

●对于 FLOTRAN 单元不允许在载荷情况下操作。

6．FLUID142 单元的其他特征

●用于模拟湍流的二方程湍流模式.

●有很多推导结果，诸如：流场分析中的马赫数、压力系数、总压、切应力、壁面处的 Y-plus、流线函数，热分析中的热流、热交换（膜）系数等。

●流体边界条件，包括：速度、压力、湍流动能，以及湍流能量耗散率。用户无需提供流场入口处湍流项的边界条件，因 FLOTRAN 对此提供的默认值适用于绝大多数分析。

●热边界条件，包括：温度、热流、体积热源、热交换（膜）系数。

用户可使用的坐标系有：笛卡尔坐标系、柱坐标系、极坐标系和轴对称坐标系。如果所计算的问题是轴对称的，激活旋转（swirl）选项即可算出垂直于对称平面的速度分量。

## 2.2 FLOTRAN 单元的局限性

下面是 FLOTRAN 单元的一些局限性：

1）在同一次分析中不能改变求解的区域。

2）ANSYS 程序的某些特征不能同 FLOTRAN 单元一起使用。

3）使用 FLOTRAN 单元时不能使用某些命令或菜单。

4）当使用 ANSYS 的图形用户界面时，程序将只能显示那些在菜单和对话框中的 FLOTRAN SetUp 部分要求了的特征和选项。

当使用 FLOTRAN 单元时，要避免使用 ANSYS 的某些特征和命令，至少要注意到在使用 FLOTRAN 单元时与其他分析稍微有些不同。当使用了无效的命令时，程序会给出相应的警告或错误信息。使用 FLOTRAN 单元要注意如下几点：

1）FLOTRAN 单元不能和其他单元联合使用。

2）节点坐标系必须与总体坐标系一致。

3）/CLEAR 命令不破坏已存在的 FLOTRAN 结果文件（Jobname.RFL），这有助于防止用户不小心破坏那些花了很多时间和精力才求得的结果，用户必须在操作系统里才能删除那些无用的结果文件。

4）CP 命令通过对自由度进行耦合来形成周期边界条件，ANSYS 命令手册对 CP 命令的描述是可以只对某些自由度进行耦合，但作 FLOTRAN 分析时周期边界的所有自由度都将被耦合。



不能对同一个单元中的节点进行耦合，并且相邻单元间节点耦合也很困难。

5）ADAPT 命令不适用于 FLOTRAN 分析。

6）不能用 ANTYPE 命令来引入 FLOTRAN 的瞬态分析。

7）FLOTRAN 分析不支持自动时间步长功能。

8）如果用户通过 BFCUM、BFDELE 或 BFUNIF 来定义节点热源，则 ANSYS 会在内部用 BFE 命令来代替。

9）FLOTRAN 分析不能使用 CE、CECMOD、CEDELE 和 DEINTF 命令。

10）FLOTRAN 分析不能使用 CNVTOL 命令来设置收敛容差。

11）不能用 DSYM 命令来定义 FLOTRAN 的对称和反对称边界条件。

12）FLOTRAN 不支持旋转坐标系中的角加速度向量。

13）在 FLOTRAN 分析中，使用 FLDATA4,TIME 命令而不是 DELTIM 命令来定义一个载荷步的时间。

14）对于 FLOTRAN 分析，不能使用 DESOL 命令或 PRESOL 命令来修改节点的热（HEAT）、流（FLOW）或流密（FLUX）结果。

15）FLOTRAN 分析不允许将积分点结果外推到节点上（ERESX 命令）。

16）FLOTRAN 分析不允许通过镜像操作来形成单元。

17）FLOTRAN 分析不能用 KBC 命令来施加渐变载荷，而必须用多个载荷步来逐渐改变载荷。

18）FLOTRAN 分析不允许用 LCCALC、LCDEF、LCFA、LCFI 等命令来作不同载荷状况之间的运算操作。

19）在 FLOTRAN 分析中不能用 LSWRITE 或 LSSOLVE 命令。

20）NCNV 命令中的收敛工具不能用于 FLOTRAN 中相互独立的求解器。

21）FLOTRAN 分析不允许用 NEQUIT 命令来定义非线性分析的平衡迭代数。

22）FLOTRAN 分析要求节点坐标系必须是总体的笛尔坐标系，故不能用 N 命令、NMODIF 命令和 NROTAT 命令的旋转域。

23）FLOTRAN 分析中，FLDATA2,ITER 命令和 FLDATA4,TIME 命令用来控制一个载荷步中的总体迭代数。

24）FLOTRAN 分析不允许用户自定义单元。

25）FLOTRAN 分析中，FLDATA2,ITER 命令和 FLDATA4,TIME 命令用来对写入数

据库中的结果进行控制。

26）PRNLD 命令不能用于 FLOTRAN 分析中，因其不能将边界条件作为可打印的单元节点载荷来保存。

27）FLOTRAN 分析中没有节点反力解。

28）部分和预定义求解选项（PSOLVE 命令定义）不适于 FLOTRAN 各自独立求解器。

29）TIME 命令不能用在 FLOTRAN 分析中。

30）FLOTRAN 用 FLDATA1,SOLU 命令而不是 TIMINT 命令来定义瞬态载荷步。

31）FLOTRAN 用 FLDATA4,TIME 命令而非 TRNOPT 命令来定义瞬态分析选项。

32）RESCONTROL 命令不适用于 FLOTRAN 分析。

33）在 FLOTRAN 中不能在关键点上用 DK 命令来定义 DOF 约束。

## 2.3 FLOTRAN 分析步骤

### 2.3.1 确定问题的区域

必须确定所分析问题的明确范围，将问题的边界设置在条件已知的地方。如果不知道精确的边界条件而必须作假定时，就不要将分析的边界设在靠近感兴趣区域的地方，也不要将边界设在求解变量变化梯度大的地方。有时也许用户并不知道自己的问题中哪个地方梯度变化最大，这就要先作一个试探性的分析，然后再根据结果来修改分析区域。

### 2.3.2 确定流体的状态

用户在此需要估计流体的特征。流体的特征是流体性质、几何边界以及流场的速度幅值的函数。FLOTRAN 能求解的流体包括气流和液流，其性质可随温度而发生显著变化，FLOTRAN 中的气流只能是理想气体。用户须自己确定温度对流体的密度、粘度和传热系数的影响是否是很重要。在大多数情况下，近似认为流体性质是常数，即不随温度而变化，都可以得到足够精确的解。

通常用雷诺数来判别流体是层流或湍流，雷诺数反映了惯性力和粘性力的相对强度。

通常用马赫数来判别流体是否可压缩。流场中任意一点的马赫数是该点流体速度与该点音速之比。当马赫数大于 0.3 时，就应考虑用可压缩算法来进行求解；当马赫数大于 0.7 时，可压缩算法与不可压缩算法之间就会有极其明显的差异。

### 2.3.3 生成有限元网格

用户必须事先确定流场中哪个地方流体的梯度变化较大，在这些地方，网格必须作

适当的调整。例如：如果用了湍流模型，靠近壁面的区域的网格密度必须比层流模型大得多。如果太稀疏，该网格就不能在求解中捕捉到由于巨大的变化梯度对流动造成的显著影响；相反，那些长边与低梯度方向一致的单元可以有很大的长宽比。

为了得到精确的结果，应使用映射网格划分，因其能在边界上更好地保持恒定的网格特性，映射网格划分可由命令 MSHKEY,1 或其相应的菜单 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas（或 Volumes）→Mapped 来实现。

### 2.3.4 施加边界条件

可在划分网格之前或之后对模型施加边界条件，此时要将模型所有的边界条件都考虑进去。如果某个相关变量的条件没有加上去，则该变量沿边界的法向值的梯度将被假定为零。求解中，可在重启动之间改变边界条件的值，如果需改变边界条件的值或不小心忽略了某边界条件，无须重启动，除非该改变引起了分析的不稳定。

### 2.3.5 设置 FLOTRAN 分析参数

为了使用诸如湍流模型或求解温度方程等选项，用户必须激活它们。流体性质等特定项目的设置，是与所求解的流体问题类型相关的。

### 2.3.6 求解

通过观察求解过程中相关变量的改变率，可以监视求解的收敛性及稳定性。这些变量包括速度、压力、温度、动能 (ENKE 自由度) 、动能耗散率 (ENDS 自由度) 、湍流量，以及有效粘度（EVIS）。一个分析通常需要多次重启动。

### 2.3.7 检查结果

可对输出结果进行后处理，也可在打印输出文件里对结果进行检查。此时用户应使用自己的工程经验来估计所用的求解手段、所定义的流体性质，以及所加的边界条件的可信程度。

## 2.4 FLOTRAN 单元相关文件

在 ANSYS 中进行的大多数流体分析都是通过多次中断和重启动来完成的，通常分析人员需要在各个重启动之间改变诸如松弛因子等参数或开关某些项（如求解温度方程的开关）。每当用户继续一个分析时，ANSYS 程序会自动将数据附加在所有的 由 FLOTRAN 单元产生的文件中。下面对 FLOTRAN 单元产生的所有文件进行说明：

1）结果文件（Jobname. RFL），包含节点结果。

2）打印文件（Jobname.PFL），包含各量的收敛记录及进/出口状态(如流量等)。

3）壁面文件（Jobname.RSW），包含壁面切应力以及 Y-Plus 信息。

4）残差文件（Jobname.RDF），包含节点残差。

5）调试文件（Jobname.DBG），包含数学求解器的有关信息。

6）结果备份文件（Jobname.RFO），包含结果文件数据。

7）重启动文件（Jobname.CFD），包含 FLOTRAN 的数据结构。

### 2.4.1 结果文件

FLOTRAN 分析的结果并不自动保存在 ANSYS 的数据库中，在每次求解之后，程序会将一个结果集附加在结果文件 Jobname.RLF 中。

用户可对结果文件的内容及程序 对结果文件的更新频率进行控制，ANSYS 命令手册中对 FLDATA5,OUTP 命令的介绍就详细说明了结果文件会基于用户的选择而保存什么内容。

在一个稳态 FLOTRAN 分析中，结果文件能保存的结果集个数是没有限制的。在求解的初期多保存几个结果有很多好处：可以比较各结果集之间的变化、可以使用不同的选项或松弛因子来从一个分析的较早状态重新开始分析。

当开始一个新分析时（在其第一次迭代之前），ANSYS 程序会保存一个结果, 中断发生时再保存结果。在这些事件之间，用户还可通过设置将一些中间结果附在结果文件里，这样就可以从较早的分析状态开始，通过激活一些不同的选项和特征来重新分析，例如，可以通过这种方式来提高分析的稳定性。

使用 ANSYS 的覆盖频率选项是一个明智的方法，它可以周期性地保存和更新一个临时的结果集，这样，当由于断电或其他系统原因而发生求解中断时，总可以有一个可用的结果集用于重新开始分析。设置覆盖频率的方式如下：

命令：FLDATA2,ITER,OVER,value

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

### 2.4.2 打印文件

Jobname.PFL 文件中包含了所有 FLOTRAN 输入参数的完整记录，该信息在每发出一个求解命令时就保存一次，以完整地记录整个分析历程。同时，所有激活了的变量的收敛过程也记录了下来，还有一个对结果的总结，即每个性质和自由度的最大及最小值，这些记录的频率都由用户自己设定。所记录的其他量还有：各记录量的平均值、质量流的边界、质量平衡的计算、所有热传导和热源的相关信息。

### 2.4.3 残差文件

节点残差文件，即 Jobname.RDF，显示了当前解收敛的好坏程度。在求解过程的每一个阶段，流场、性质场、温度场都用于对每个自由度计算系数矩阵和强迫函数。如果解完全收敛，这些矩阵和强迫函数将会生成一个与产生它们的速度场一样的速度场，同时，矩阵方程的残差也会变得很小。要得到一个残差文件，必须至少执行一次迭代。

当求解过程发生振荡时，残差的幅值将显示分析的错误所在（矩阵的主对角元素对残差作归一化处理）。这种归一化使用户可对自由度的值及其残差作比较。

对每一个激活了的自由度计算残差并将其存入残差文件的方式如下：

命令：FLDATA5,OUTP,RESI,TRUE

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Additional Out→Residual File

要读取残差文件，可通过菜单 Main Menu→General Postproc→FLOTRAN 2.1A 或命令 FLREAD 来实现。

### 2.4.4 重启动文件

通常，FLOTRAN 在一个重启动的起始处计算数据结构。对于一个大模型，这种计算将消耗大量的时间。为了避免这种重新计算，可要求 FLOTRAN 将数据结构保存在重启动文件 Jobname.CFD 中，FLOTRAN 从 ANSYS 的数据库中产生该文件。

对 Jobname.CFD 文件读和写的方式如下：

命令：FLDATA32,REST,RFIL,T

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Restart Options→CFD Restart File

可将 RFIL 状态设置为开(ON)或关(OFF)。若设为开，则 FLOTRAN 开始执行分析时将读入重启动文件。若此时重启动文件不存在，则将产生一个重启动文件。

如果在改变了边界条件之后再进行重启动分析，则必须覆盖掉业已存在的.CFD 文件以使得 ANSYS 能用新的边界条件进行重新分析，覆盖.CFD 文件的方式如下：

命令：FLDATA32,REST, WFIL,T

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Restart Options→CFD Restart File

这就使 FLOTRAN 在下一载荷步产生一个新的重启动文件，并自动将 RFIL 状态设置为关。当新的重启动文件产生之后，用 FLDATA32,REST,RFIL,T 命令使随后的重启动能使用新的重启动文件。

### 2.4.5 FLOTRAN 重启动分析（续算）

用户可在结果文件 Jobname.RFL 中任意一个解集的基础上开始一个重启动分析。重启动位置的设置可基于解集号(NSET)、迭代数(ITER)、载荷步/子步号(LSTP)或瞬态分析的时间(TIME)，方式如下：

命令： FLDATA32,REST,lable,value

其中，lable 为上面的 NSET、ITER、LSTP、TIME 等。

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Restart Options→Restart/Iteratio（或 Restart/Load step、Restart/Set 等）

当重启动一个分析时，ANSYS 将原始的结果文件复制到 Jobname.RSO 中并将重启动点、所有在重启动点之前的结果集、所有的后续结果集放在新的结果文件中。如果在

FLDATA32,REST 命令中的 value 值是一个负值，则将不产生 Jobname.RSO 文件，而重启动的点将由 value 的绝对值来指定。

## 2.5 提高收敛性和稳定性常用的工具

### 2.5.1 松弛因子

松弛因子是一个介于 0 和 1 之间的小数，它表示旧结果与附加在旧结果上以形成新结果的最近一次计算量之间的变化量。设置松弛因子的方式如下：

命令：FLDATA25,RELX,lable,value

菜单：

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN SetUp→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN SetUp→Relax/Stab/Cap→Prop Relaxation

Main Menu→Solution→FLOTRAN SetUp→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation

Main Menu→Solution→FLOTRAN SetUp→Relax/Stab/Cap→Prop Relaxation

### 2.5.2 惯性松弛

对某个自由度的方程组的惯性松弛，就是使其矩阵的主对角占优以保持求解的稳定性。如果一个解在收敛过程中没有发生舍入误差，则惯性释放的值不会影响到求解的最终结果。但是通常的求解过程都会发生舍入误差，故惯性松弛可能对结果产生影响。用户可对动量方程（MOME）、湍流方程（TURB）、压力方程（PRES）和温度方程（TEMP）施加惯性松弛，其方式如下：

命令：FLDATA26,STAB,lable,value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN SetUp→Relax/Stab/Cap→Stability Parms

Main Menu→Solution→FLOTRAN SetUp→Relax/Stab/Cap→Stability Parms

惯性松弛因子是以所加项的分母的形式出现的，故其值越小，所起作用越大，其典型值介于 1.0（作用中等）～$1.0\times10^{-7}$（作用很大）之间。

### 2.5.3 修正的惯性松弛

为了保证得到正的对角线，修正的惯性松弛对角项增加了一个局部正值。

可以用以下的任何一种方法将修正的惯性松弛带入动量方程（MOME）、湍流方程（TURB）和温度方程（TEMP）：

命令：FLDATA34,MIR,label,value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→MIR Stabilization

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→MIR Stabilization

修正惯性松弛因子的推荐范围是 0.1～1.0。惯性松弛和修正惯性松弛是相互排斥的。

### 2.5.4 人工粘性

人工粘性用于在梯度较大的区域平抑速度解，它有助于可压缩问题的收敛，也有助于对有分布阻力的不可压缩问题的速度解进行平抑。对于不可压缩问题，应使人工粘性的幅值与有效粘性的幅值处于相同的数量级。施加人工粘性的方式如下：

命令：FLDATA26,STAB,VISC,value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN SetUp→Relax/Stab/Cap→Stability Parms

Main Menu→Solution→FLOTRAN SetUp→Relax/Stab/Cap→Stability Parms

### 2.5.5 速度限制

速度限制使所求解量不能超出用户所定义的值，可对速度、压力和温度自由度进行限制（VX、VY、VZ、PRES、TEMP），方式如下：

命令：FLDATA31,CAPP

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN SetUp→Relax/Stab/Cap→Results Capping

Main Menu→Solution→FLOTRAN SetUp→Relax/Stab/Cap→Results Capping

速度限值可消除速度尖峰的不利影响，这种速度尖峰通常发生在收敛过程中的较早阶段。它还特别适用于可压缩流分析，因这类分析中速度尖峰通常使动能项大到产生负的静温。

当对压力进行限制时，所限的值是由压力方程解算出来的压力而不是松弛后的压力，故当限值后重启动时，压力值仍有可能超出限值。



当有速度限值时，质量有可能不守恒。

### 2.5.6 面积积分阶次

默认的用于计算单元面积积分的阶次是单点积分，用户可对其进行控制。对于轴对称问题，求解时，该值自动设为 2，因为当面积积分阶次为 2 时，可使含有异常形状单元的问题收敛到更精确的解。用下面的方式改变动量、压力、热或湍流项的面积积分阶次：

命令：FLDATA30,QUAD,lable,value

其中，lable 为要改变的单元积分；value 为积分点的数目。

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN SetUp→Mod Res/Quad Ord→CFD Quad Orders

Main Menu→Solution→FLOTRAN SetUp→Mod Res/Quad Ord→CFD Quad Orders

## 2.6 评价 FLOTRAN 分析

分析人员必须回答的两个问题是：

1）所作的分析是何时结束的？

2）所作的分析是否是正确的？

这两个问题是相互关联的，因为，如果没有正确地设置和正确地分析一个流体问题，它一般都是不会收敛的。如果所输入的初始参数和所有的边界条件都是正确的，则当所有变量的收敛监测量都停止增长，以及所有求解量的平均、最大、最小值都不再升降时，求解过程就算是完成了。然而，这并不能保证所求解的结果是唯一正确的，因为自然界本身并不保证存在唯一解。振荡问题（例如，柱体绕流的涡旋脱落问题）用稳态或瞬态求解技术都不能得到一个稳定的解。要验证一个分析是稳定的还是振荡的，可以通过对它执行大量的迭代求解来实现。

ANSYS 将求解变量的平均、最小、最大值保存在文件 Jobname.RFL 中，该文件同时还保存了 FLOTRAN 的输入数据和计算出的收敛监测量、所有自由度的结果总结、层流特性和有效特性。可用下面的方式来规定 ANSYS 进行结果总结的频率：

命令：FLDATA5,OUTP,SUMF,value

菜单：

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN SetUp→Additional Out→RFL Out Derived

Main Menu→Solution→FLOTRAN SetUp→Additional Out→RFL Out Derived

## 2.7 验证结果

验证求解结果的可靠性是所有分析人员的责任。如果一个 FLOTRAN 分析得到了非预期的结果，则应进行下列，这些操作的大部分都可以在开始一个分析前完成。即使只进行了零次迭代，ANSYS 也会生成一个 Jobname.RFL 文件并检查所有的输入数据。

1）检查作为结果总结的一部分而打印出来的质量平衡情况。内部检查将确定是否有任何的可能会通过模型的质量流，允许质量流的边界条件是：

a.确定的速度边界条件；

b.确定的压力边界条件；

c.未确定的边界(这有可能是由于用户忘了施加边界条件而致)。

ANSYS 会将入口和出口边界编号列表，而这些应与所希望的条件相对应。

2）在 ANSYS 里检查边界条件，以保证其正确性。

3）检查所定义的流体性质及其随温度的可变动性正确与否，这可在.RFL 文件中方便地检查。

4）检查用以建立模型的单位制与用以定义流体性质的单位制是否一致。

5）有时还需确认与所选选项相联系的方程的求解是否正确（例如可压缩流中的压力方程）。

6）如果求解发散，可能的原因还有：有限元网格不够精细，或者邻近出口处流场梯度太大。要解决这些问题，可以使用一些诸如惯性松弛等有助于收敛的手段。本书后面将详述各种松弛技术。

7）如果只有某个特定的量产生发散，则可将该量重新初始化到一个单值，并作重启动分析，方式如下：

命令：FLDATA29,MODV

菜单：

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN SetUp→Mod Res/Quad Ord→Modify Results

Main Menu→Solution→FLOTRAN SetUp→Mod Res/Quad Ord→Modify Results

每个流动分析都需要流体密度和粘度。另外，热分析还需要流体的导热系数及比热容。流体容积分析（VOF）还需要流体性质表面张力系数和壁面静力接触角。可使用以下方法来确定流体的性质：

命令：FLDATA7,PROT,Label,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

以上所示的命令简单地设置了流体性质类型。选定性质类型之后，需要设置其值。

可使用以下方法之一来确定非流体性质（密度、比热容及导热系数）：

命令：MP

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Other→Change Mat Props→Material Models

Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Other→Change Mat Props→Material Models

非流体导热系数可随温度变化，同时也支持非流体导热系数的正交各向异性变化。

ANSYS 对密度或粘度性质提供了非默认值，这就避免了默认性质使分析产生一个非预期的流动形态。

-1 值会出现在必须设置的性质的用户界面上。如果没有设置这些性质就进行分析，就会出现错误信息，并提示必须确定这些性质。

# 2.8 流体基本属性

## 2.8.1 比热容

比热容类型可以选择 CONSTANT、CMIX、TABLE，或通过一个文件(floprp.ans)或子程序（USER）定义。表 2-4 列出了 AIR 性质类型的单位。

如果性质类型选项为 CONSTANT，那么就用“FLDATA8,NOMI”命令或等效菜单路径来设置性质的常数值。例如，可通过命令“FLDATA8，NOMI，SPHT，1.205”将比热容设为 1.205。

表 2-4 AIR 性质类型的单位

| 性质 | 单位制 | 压力单位 | 密度单位 | 粘度单位 |
|---|---|---|---|---|
| AIR | meter-kg-sec | Pa | $kg/m^3$ | kg/（m.s） |
| AIR-SI | meter-kg-sec | Pa | $kg/m^3$ | kg/（m.s） |
| AIR-CM | cm-g-sec | $dyn/cm^2$ | $g/cm^3$ | g/（cm.s） |
| AIR-MM | mm-g-sec | Pa | $g/mm^3$ | g/（mm.s） |
| AIR-FT | ft-slug-sec | $lbf/ft^2$ | $slugs/ft^3$ | slug/（ft.s） |
| AIR-IN | in-($lbf-s^2/in$)-sec | psi | $lbf.s^2/in^4$ | （lbf.s）$/in^2$ |

如果性质类型为 CMIX，则有

$$比热容 = \sum_{i=1}^{N} Y_i C_{pi}$$

式中，$N$ 为定义的组分数；$Y_i$ 为 ith 组分的质量分数；$C_{pi}$ 为 ith 组分的比热容。

如果性质类型为 TABLE，那么比热容为由 MPTEMP 或 MPDATA 命令（或相应的菜单）提供的数据点之间的线性插值。

## 2.8.2 密度和导热系数

对于密度和导热系数，可以选择的性质类型有 CONSTANT、CMIX、TABLE、GAS、LIQUID，或通过一个文件(floprp.ans)或子程序（USER）定义。对于密度，还有一个另外的性质类型选项：CGAS。

ANSYS 会自动地提供性质数据库中 AIR 性质类型的相关输入。

如果性质类型选项为 CONSTANT，那么就使用“FLDATA8，NOMI”命令或相应的菜单路径设置性质的常数值。例如，通过命令“FLDATA8，NOMI，DENS，1.205”将密度设为 1.205。

如果性质类型为 GAS，对于密度就使用理想气体定理。对于这个选项可以这样确定密度= NOMI *(P/COF2) / (T/COF1)

如果选项为 LIQUID，那么对密度就使用一个以温度为函数的二阶多项式。

$$密度 = NOMI + COF2(T - COF1) + COF3(T - COF1)^2$$

如果性质类型为 CMIX，则有

$$密度 = \sum_{i=1}^{N} Y_i \rho_i$$

式中，$N$ 为定义的组分数；$Y_i$ 为 ith 组分的质量分数；$\rho_i$ 为 ith 组分的密度。

如果性质为 CGAS，则有

$$密度 = \frac{P}{RT\sum_{i}^{N}(Y_i / M_i)}$$

式中，$N$ 为定义的组分数；$Y_i$ 为 ith 组分的质量分数；$M_i$ 为 ith 组分的相对分子质量；$R$ 为气体常数；$P$ 为绝对压力。

如果性质类型为 TABLE，密度为由 MPTEMP 或 MPDATA 命令（或它们的 GUI 等值量）提供的数据点之间的线性插值。

如果选项为 USER，则在自编程的子程序 UserDens 中计算密度。在这个子程序中有 4 个可用的系数：NOMI、COF1、COF2、COF3。

如果性质类型选项为 CONSTANT，那么就用“FLDATA8,NOMI”命令或相应的菜单来设置性质的常数值。例如，可通过命令“FLDATA8，NOMI，COND，1.205”将导热系数设为 1.205。

如果选项为 GAS，则对导热系数使用气体的 Sutherland 定理，可输入参数 NOMI、COF1、COF2。

理想气体常数 R 定义为(COF2/NOMI*COF1)

导热系数（"Property"）：$Property/NOMI=(T/COF1)^{1.5}\quad(COF1 + COF2)/(T + COF2)$

如果选项为 LIQUID，那么就对导热系数使用 Sutherland 定理。

导热系数（"Property"）：$Property/NOMI= EXP\{COF2(1/T - 1/COF1) + COF3(1/T - 1/COF1)^2\}$

如果性质类型为 CMIX，则有

$$\text{导热系数} = \sum_{i=1}^{N} Y_i K_i$$

式中，$N$ 为定义的组分数；$Y_i$ 为 ith 组分的质量分数；$K_i$ 为 ith 组分的导热系数。

如果性质类型为 TABLE，则密度为由 MPTEMP 或 MPDATA 命令（或相应的菜单）提供的数据点之间的线性插值。

如果选项为 USER，则在自编程的子程序 UserCond 中计算导热系数。在这个子程序中有 4 个可用的系数：NOMI,COF1,COF2,COF3。

## 2.8.3 粘度

对于粘度，可以选择的性质类型为 CMIX、TABLE、CONSTANT、LIQUID、GAS、Power Law (POWL)、Bingham (BING)、Carreau (CARR)，或通过一个文件(floprp.ans)及程序（USER 或 USRV）定义。AIR 和 GAS 性质类型假设流体为一种具有恒定比热容的理想气体，并假设粘度和导热系数随温度的变化遵循气体的 Sutherland 定理。LIQUID 假设为一个密度随温度变化的二次多项式、比热容的一个恒定值以及对于密度和导热系数的液体的 Sutherland 定理。

粘度是速度梯度的函数，通过非牛顿粘度类型呈现出来：Power Law、Bingham、Carreau。

如果性质类型选项为 CONSTANT，那么就用“FLDATA8,NOMI”命令或相应的菜单来设置性质的常数值。例如，可通过命令“FLDATA8,NOMI,VISC,1.205”将粘度设为 1.205。

如果选项为 GAS，对于粘度就使用气体的 Sutherland 定理，可以输入参数 NOMI、COF1 和 COF2。

理想气体常数 R 定义为(COF2/NOMI*COF1)。

粘度（"Property"）：Property/NOMI=(T/COF1)$^{1.5}$ (COF1 + COF2)/(T + COF2)。

作为使用这种关系的一个例子，假设计算以温度为函数的粘度时有两个数据点可用：

T=760 时，粘度=4.18×10$^{-5}$。

T=1010 时，粘度=5.76×10$^{-5}$。

把第一个数据点视为名义值，这就意味着 NOMI = 4.18×10$^{-5}$ 以及 COF1 = 760。在 Sutherland 关系式中：

Property/4.18×10$^{-5}$=(T/760)$^{1.5}$ (760 + COF2)/(T + COF2)

通过把"Property"设为 5.76×10$^{-5}$ 及 T = 1010，使用剩下的那个数据点来计算 COF2。因此，可根据数据点计算常数。

如果选项为 LIQUID，那么对粘度就使用液体的 Sutherland 定理：

粘度：Property/NOMI= EXP{COF2(1/T - 1/COF1) + COF3(1/T - 1/COF1)$^2$}

如果选项为 POWL，那么对粘度就使用非牛顿 Power Law 模型：

Property/4.18×10$^{-5}$ = (T/760)$^{1.5}$ (760 + COF2)/(T + COF2)

如果选项为 BING，那么对粘度就使用非牛顿 Bingham 模型：

$$粘度=\begin{cases} NOMI*COF2*D^{(COF3-1)} & ,D>COF1 \\ NOMI*COF2*COF1^{(COF3-1)} & ,D\le COF1 \end{cases}$$

如果性质类型为 CMIX，则有

$$粘度=\begin{cases} NOMI+\dfrac{COF}{D} & ,D\ge\dfrac{COF1}{COF2-NOMI} \\ COF & ,D<\dfrac{COF1}{COV2-NOMI} \end{cases}$$

如果性质类型为 TABLE，则密度为由 MPTEMP 或 MPDATA 命令（或相应的菜单）提供的数据点之间的线性插值。

如果选项为 USRV 或 USER，则在自编程的子程序 UserVisLaw 中计算密度。在这个子程序中有 4 个可用的系数：NOMI,COF1,COF2,COF3。

## 2.8.4 表面张力系数

表面张力系数的类型可以选择 CONSTANT、LIQUID 或通过程序自定义（USER）。

## 2.8.5 壁面静态接触角

对于壁面静态接触角，只有 CONSTANT 是有效的性质类型。

为了设置常数值，可使用“FLDATA8，NOMI”命令或相应菜单。例如，可通过命令“FLDATA8，NOMI，WSCA，120.0”将壁面静态接触角设为 120.0º 。

壁面静态接触角默认为 90º。角度小于 90º 表示一个有粘着力的壁面条件。角度在 90º～180º 之间表示一个无粘着力的壁面条件。实际上，角度不仅仅是流体的一个材料性质，并且取决于局部流体和壁面条件。为了方便起见，FLOTRAN 把它视为一个单一的输入常数。

### 2.8.6 设置流体性质的步骤

必须使用一组一致的单位（重力加速度 *g* 必须一致）。当然，建立有限元模型时必须假定静长度单位。对于空气，还有另外的选择。密度的单位是质量/体积的形式，在表格中可以省略。

用以下方法设置性质类型：

命令：FLDATA7,PROT,Label,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

其中，Label 可以选择 DENS (密度)、VISC (粘度)、COND (导热系数)、SPHT (比热容) 或 SFTS (表面张力系数)。

Value 可以选择表 2-5 中列出的性质类型中的任何一个，或者可以确定一个流体性质的表格。为了确定表格，把表格名称放入百分比符号中（%）（例如，FLDATA7,PROT,DENS,%Table%）。

（1）使用流体性质表格　如果交互式地工作，在使用表格施加载荷之前要定义一个新的表格。可以通过 Utility M 设置流体性质的步骤交互式地定义一个表格。

定义表格时，可以定义以下基本变量：

温度（TEMP）

压力(PRESSURE)

时间 (TIME)

X 坐标 (X)

Y 坐标 (Y)

Z 坐标(Z)

速度 (VELOCITY)

参考 X 坐标 (Xr) (仅对 ALE 公式)

参考 Y 坐标(Yr) (仅对 ALE 公式)

参考 Z 坐标 (Zr) (仅对 ALE 公式)

括号中显示了通过*DIM 命令使用的有效标签。

如果需要确定一个除了列出来的基本变量之外的变量，可以通过定义一个自变量来实现。为了确定一个自变量，要对自变量定义一个另外的表格，这个表格必须和自变量有相同的名称，并且是一个基本变量或另一个自变量的函数

（2）表 2-5 描述了确定性质类型　一旦选择了性质类型，就不必确定性质的任何一个系数。如果将 characters _B 添加到性质类型中（例如上面所列的 AIR 类型中），理想气体定理计算中的压力就位于相应于大气压力的恒定密度处。

表 2-5 确定性质类型

| 性质类型 | 自变量 |
|---|---|
| 恒定性质 | CONSTANT |
| 气体性质 | GAS |
| 液体性质 | LIQUID |
| 性质值及相应温度值的表格（使用 LIQUID 和 MPTEMP 命令进入） | TABLE |
| 以 meter-kg-sec 为单位的空气性质 | AIR 或 AIR-SI |
| 以 meter-kg-sec 为单位的空气性质，其压力设为对密度的赋值的参考压力 | AIR_B 或 AIR-SI_B |
| 以 cm-g-sec 为单位的空气性质 | AIR-CM |
| 以 cm-g-sec 为单位的空气性质，其压力设为对密度的赋值的参考压力 | AIR-CM_B |
| 以 mm-g-sec 为单位的空气性质 | AIR-MM |
| 以 mm-g-sec 为单位的空气性质，其压力设为对密度的赋值的参考压力 | AIR-MM_B |
| 以 fl-slug-sec 为单位的空气性质 | AIR-FT |
| 以 fl-slug-sec 为单位的空气性质，其压力设为对密度的赋值的参考压力 | AIR-FT_B |
| 以 in-(lbf-$s^2$/in)-sec 为单位的空气性质（产生压力的单位 psi） | AIR-IN |
| 以 in-(lbf-$s^2$/in)-sec 为单位的空气性质（产生压力的单位 psi），其压力设为对密度的赋值的参考压力 | AIR-IN_B |
| Power Law 非牛顿粘度类型 | POWL |
| Carreau 非牛顿粘度类型 | CARR |
| Bingham 非牛顿粘度类型 | BING |
| 性质是组分成分的平均质量分数 | CMIX |
| 通过子程序自定义：对于粘度为 UserVisLaw，对于比热容为 UserVisLaw，对于密度为 UserDens，对于导热系数为 UserCond，对于表面张力为 UserCond | USER |
| 基于组分质量分数的理想气体定理的变化。仅适用于密度 | CGAS |

如果使用性质类型 CONSTANT、GAS 或 LIQUID，就必须确定性质系数。可使用以下命令或菜单：

命令：FLDATA8,NOMI,Label,Value

FLDATA9,COF1,Label,Value

FLDATA10,COF2,Label,Value

FLDATA11,COF3,Label,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

如果使用命令，就在每个命令的标号栏中输入性质。

## 2.9 初始属性和变化属性

分析开始时，ANSYS 基于规定的性质类型和适当的常数上计算性质。为了设置初始温度，可选择以下方法：

命令：FLDATA14,TEMP,NOMI,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions

可以选择把这个温度视为一个绝对的或一个相对的温度。如果是一个相对温度，相对温度和绝对温度之间的差值可通过以下方法设定。

命令：TOFFST,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions

## 2.10 使用 ANSYS 非牛顿流体性质

ANSYS 程序能够确定非牛顿流体流动的粘度（仅用 FLUID141 和 FLUID142 单元便可使用这种性能），可以在 4 种模型中选择：

1）Power Law 模型，适用于建立聚合物、血液、胶水等的模型。

2）Carreau 模型，克服了 Power Law 模型的某些缺点。当流体具有剪切速率的中间值，但保留了趋于 0 或无穷剪切速率时使用这个模型。

3）Bingham 模型，适用于建立泥浆和粘土的模型。

4）一个自编程的子程序 UserVisLaw，它在选择粘性模型时提供了较大的弹性。

在已经建立问题的模型并对其划分网格后，以及施加边界条件后，可以有代表性地选择这些模型中的一个。

### 2.10.1 激活 Power Law 模型

为了激活 Power Law 粘度模型，可使用以下方法：

命令：FLDATA7,PROT,VISC,POWL

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

为了确定与 Power Law 模型相关的 4 个系数，可使用以上菜单或命令：

命令：FLDATA8,NOMI,VISC,Value (确定名义粘度)

FLDATA9,COF1,VISC,Value (确定中止剪切速率)

FLDATA10,COF2,VISC,Value (确定粘度)

FLDATA11,COF3,VISC,Value (确定幂)

一旦确定了系数，就可以通过 SOLVE 命令或以下菜单来运行程序：

Main Menu→Solution→Run FLOTRAN。

### 2.10.2 激活 Carreau 模型

为了激活 Carreau 模型，发布命令或使用以下所示的菜单路径之一：

命令：FLDATA7,PROT,VISC,CARR

GUI：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

选择以上中的任意一个便会自动发布其他的命令来设置输出和存储控制以及性质变化标记。

需要确定与 Carreau 模型相关的 4 个系数，可使用以上所示的菜单路径或以下的命令：

命令：FLDATA8,NOMI,VISC,Value (确定 0 剪切粘度)

FLDATA9,COF1,VISC,Value (确定无限大的剪切粘度)

FLDATA10,COF2,VISC,Value (确定时间常数)

FLDATA11,COF3,VISC,Value (确定幂)

一旦确定了这些系数，就可以发布 SOLVE 命令或选择菜单路径

Main Menu→Solution→Run FLOTRAN。

### 2.10.3 激活 Bingham 模型

为了激活 Bingham 模型，可使用以下方法：

命令：FLDATA7,PROT,VISC,BING

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

为了确定与 Bingham 模型相关的系数，可使用以上菜单路径或以下命令：

FLDATA8,NOMI,VISC,Value (确定塑性粘度)

FLDATA9,COF1,VISC,Value (确定塑性/屈服应力)

FLDATA10,COF2,VISC,Value (确定牛顿粘度)

也可以确定一个初始粘度来加速收敛。通过以下方法可以有代表性地将此粘度设为牛顿粘度（即 COF2）：

命令：FLDATA12,PROP,VISC,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

## 2.11 用户编程定义属性

自编程子程序适用于流体区域的比热容、密度、粘度、表面张力系数及导热系数。由于程序非常相似，这里仅描述一种性质。

如果想要使用自编程粘度子程序 USERVISLAW，对正在分析的特定模型就需要把其用户化。

编好子程序，使其与 ANSYS 库连接起来，并使一个执行复制可用，然后就可以重新开始对模型进行分析，并且激活已定义的粘度模型。可以使用以下方法：

命令：FLDATA7,PROT,VISC,USRV (或 USER)

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

在这个点上，可能想要确定的每一个性质都是最新的，并且想使粘度输出进入到结果文件中。为了这样做，可使用以下命令或菜单：

命令：FLDATA12,PROP,UFRQ,1

FLDATA5,OUTP,VISC,T

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

接下来需要确定与自定义粘度模型相关的 4 个系数。可使用以上所示的菜单路径，或使用以下的命令：

命令：FLDATA7,NOMI,VISC,Value (确定系数 1)

FLDATA6,COF1,VISC,Value (确定系数 2)

FLDATA9,COF2,VISC,Value (确定系数 3)

FLDATA10,COF3,VISC,Value (确定系数 4)

子程序就产生了一个 Power Law 粘度模型。

也可以确定一个初始粘度来加速收敛，可通过以下方法：

命令：FLDATA12,PROP,IVISC,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

一旦确定了系数以及随意的一个初始粘度，就可以通过 SOLVE 命令或选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN 菜单来求解模型。

# 第 3 章

# FLOTRAN 特性

本章介绍了坐标系、旋转参考系、涡流和分布式阻力的原理以及设置方法。

在 FLOTRAN 设置命令一节中介绍了 23 种命令设置 ,基本包括了 FLOTRAN 所用到的命令。读者应仔细阅读这部分内容，这对以后编写命令流有很大的帮助。

学 习 要 点

- 了解坐标系、旋转参考系、涡流和分布式阻力的设置方法
- 熟悉并理解 FLOTRAN 命令的设置

# 3.1 坐标系

可以利用以下方法设置坐标系：

命令：KEYOPT

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→FLOTRAN Coor Sys

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→FLOTRAN Coor Sys

表 3-1 中介绍了如何选择不同的坐标系，并且也介绍了在此坐标系中速度的自由度。在笛卡尔直角坐标系中 KEYOPT 的默认值是 0。

表 3-1 坐标系的说明

| 坐标系 | KEYOPT(3) | VX | VY | VZ |
|---|---|---|---|---|
| 直角坐标系 | 0 | X | Y | Z |
| 平面轴对称坐标系（Y 轴） | 1 | radial | axial | swirl |
| 平面轴对称坐标系（X 轴） | 2 | axial | radial | swirl |
| 平面极坐标系 | 3 | radial | theta | N/A |
| 圆柱坐标系 | 3 | radial | theta | axial |

对于轴对称问题，旋转速度 VZ 正方向符合右手定则。如图 3-1 所示，对于关于 Y 轴对称的模型，旋转速度 VZ 的正方向应该垂直进入平面；对于关于 X 轴对称的模型，旋转速度 VZ 的正方向应该从平面垂直出来。当设置旋转坐标系的边界条件时，需要用到旋转速度的正负方向。

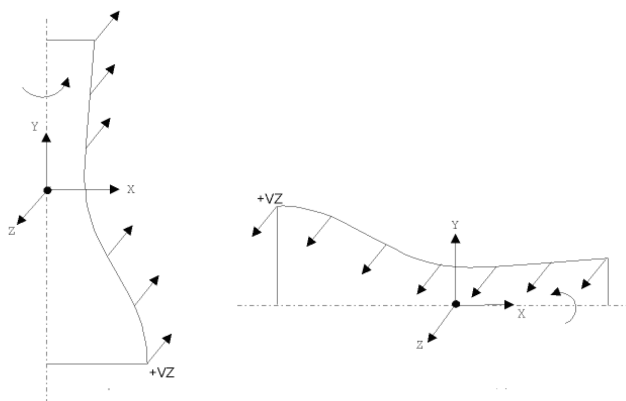



图 3-1 轴对称模型旋转速度 VZ 的正方向



当 KEYOPT（3）设为 3，坐标系为圆柱坐标系时，重力加速度的方向只能是 Z 方向。

## 3.2 旋转参考系

在旋转坐标系中分析问题时，可以在一个角速度不变的坐标系中计算或指定不同的速度，这种方法对泵的叶片旋转分析很有帮助。图 3-2 是动坐标系下的旋转流问题的原理图。图 3-3 是旋转坐标系下的旋转问题的原理图。

可以利用以下方法设置转速：

命令：CGOMGA

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Rotating Coords

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Rotating Coords

除了 3-D 直角坐标系之外的所有坐标系必须指定旋转轴为 Z 轴。对于平面轴对称坐标系，ANSYS 程序会自动指定 Z 轴为旋转轴。

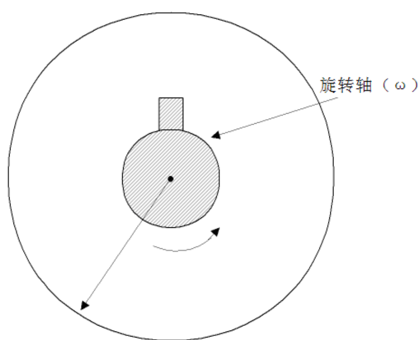



图 3-2 旋转轴问题

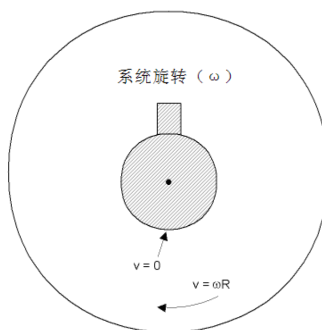



图 3-3 系统旋转问题

可以利用以下方法设置旋转轴的偏移量：

命令：CGLOC

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Rotating Coords

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Rotating Coords

## 3.3 涡流

涡流只适用于轴对称问题，并且垂直于 X-Y 平面。可以利用以下方法激活涡流：

命令：FLDATA1,SOLU,SWIRL,TRUE

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Solution Options

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options

涡流入口的动壁（a moving wall），如旋转轴，或其他部分可能引起涡流方向的变化。由于涡流是轴对称问题，因此在“theta”方向没有变化。可以通过求解涡流方向的动量

方程来计算涡流问题。

## 3.4 分布式阻力

分布式阻力是典型的宏观集合特性，它与相关区域没有直接联系。当定义分布式阻力为常数时，分布式阻力可以应用于单元上。由于分布式阻力参数可以描述一定区域内已知的流动形态，因此可以不使用湍流模型。在分布式阻力区域内，通过设置 ENKE=0 和 ENDS=1 可以关闭湍流模型。

可以利用以下方法关闭湍流模型：

命令：D

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Turbulence→On Nodes

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Turbulence→On Nodes

上面所涉及到的分布式阻力可以描述系统的损失。可以用类似的方法模拟动量源。这些动量源可以代替系统中的风机或水泵。风机或水泵模型不能描述一定区域的流动细节，但是对系统的其他区域有一定的影响。

ANSYS 程序支持两种类型的风机模型。“Type Four”风机模型只能沿特定的坐标方向模拟，而“Type Five”模型可以在任意方向上模拟。

动量源 $p$ 与任意方向 $s$ 的关系如下：

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}s}=C_1+C_2\left|V\right|+C_3V^2$$

式中，$V$ 是任意方向的速度；$C_1$、$C_2$ 和 $C_3$ 是常数。

一般情况下，可以通过风机曲线上的三对压力-速度值确定风机或水泵系数。如果流动方向是负的，要注意系数符号的改变。

如果 $\theta_x$ 是任意方向 $s$ 与 $x$ 轴的夹角，则方向常数为

$$C_{1x}=C_1\cos\theta_x$$

$$C_{2x}=C_2$$

$$C_{3x}=\frac{C_3}{\cos\theta_x}$$

同样的，如果 $\theta_y$ 和 $\theta_z$ 分别是任意方向 $s$ 与 $y$ 轴和 $z$ 轴的夹角，则方向常数为

$$C_{1y}=C_1\cos\theta_y \qquad C_{1z}=C_1\cos\theta_z$$

$$C_{2y}=C_2 \qquad C_{2z}=C_2$$

$$C_{3y}=\frac{C_3}{\cos\theta_y} \qquad C_{3z}=\frac{C_3}{\cos\theta_z}$$

# 3.5 FLOTRAN 设置命令

FLOTRAN 设置命令是 FLOTRAN 分析的重要组成部分，了解每种命令的功能和操作方法会为以后作实例分析打下良好的基础。

## 3.5.1 FLOTRAN 求解控制命令

功能：设定求解控制

命令：FLDATA1, SOLU, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Solution Options

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Option

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

TRAN：求解稳态或非稳态选项，默认为稳态。

FLOW：是否求解流动方程选项，默认为求解流动方程。

TEMP：是否求解温度方程选项，默认为绝热(不求解温度方程)。

TURB：层流或湍流选项，默认为层流。

COMP：不可压缩或可压缩选项，默认为不可压缩流。

SWRL：求解轴对称旋流选项，默认为“No”。

SPEC：求解多组分疏运选项，默认为“No”。

Value 的值为“Yes”或“No”二者之一。

该命令的菜单形式如图 3-4 所示。

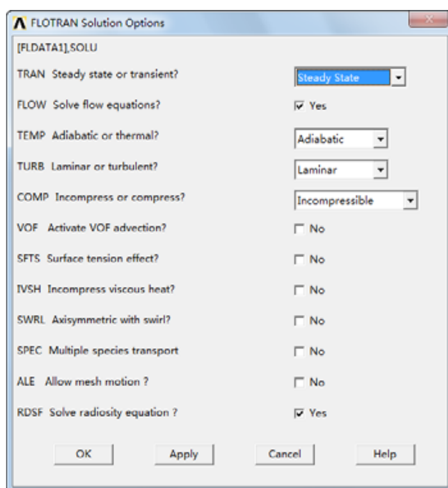



图 3-4 FLOTRAN 求解控制选项

## 3.5.2 FLOTRAN 执行及输出控制命令——稳态控制参数设置

1）功能：设置稳态流的迭代及输出控制

命令：FLDATA2, ITER, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

EXEC：总体迭代次数，默认为 10 次。

OVER：结果文件覆盖频率(每隔 Value 次迭代)，默认为 0。

APPE： 结果文件附加频率(每隔 Value 次迭代)，默认为 0。

Value 的值以上 Lable 各自的迭代次数。

2）功能：设置压力和温度的收敛准则。

命令：FLDATA3, TERM, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

PRES：设置压力收敛准则，默认为 $10^{-8}$。

TERM：设置温度收敛准则，默认为 $10^{-8}$。

Value 为以上两项各自的收敛值。

3）功能：设置输出控制

命令：FLDATA5, OUTP, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

SUMF：输出总结的频率(每隔 Value 次迭代)，默认为 10。

Value 为上面 SUMF 的迭代数。以上三条命令的菜单形式如图 3-5 所示。

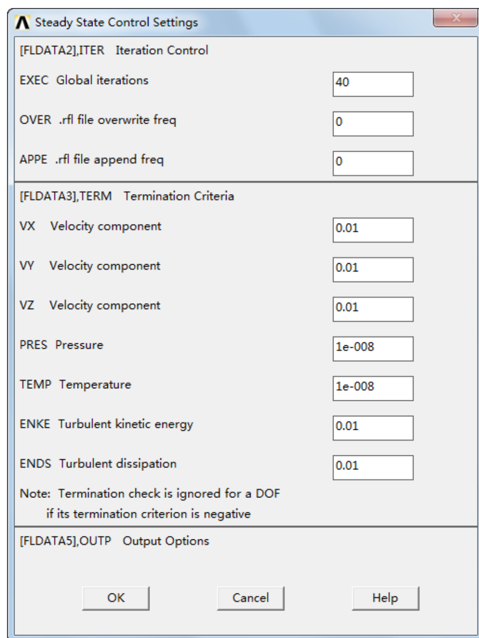



图 3-5 稳态控制参数设置

### 3.5.3 FLOTRAN 执行及输出控制命令——瞬态控制参数设置

1）功能：基于瞬态时间来设置瞬态分析的求解及输出控制。

命令：FLDATA4, TIME, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

其中，Lable 选项及其各自含义如下：

STEP：定义时间步长，当在上面的对话框中设置为用户自定义时，该选项的 Value 值应为一正值，表示 Yes 正的时间步长，命令输入就在 Value 处输一 Yes 正时间即可；当在上面的对话框中设置为 Advection 时，即为由程序定义时间步长，命令输入时可在 Value 处输-1、-2、-3 或-4 四值之一，其含义分别如下：

✧ −1：时间步长会小到在单一的任何一个时间步长内，流场中任意一点的运动距离都不会大于一个单元的长度。
✧ −2：只用于可压缩流分析，它使时间步长会小到在单一的任何一个时间步长内，流场中压力信号的传输距离都不会大于一个单元的长度。
✧ −3：只用于可压缩流分析，它使时间步长取上面-1 和-2 项中的最小值。
✧ −4：只用于纯传热分析（不计算流场方程），它使时间步长会小到在单一的任何一个时间步长内，任何一个“热点”的传导或对流距离都不会大于一个单元的

长度。

ISTEP：指定初始时间步长，仅在时间步长由程序定义时有效，默认为 0。

NUMB：指定时间步的数目，默认为 10。

TEND：指定瞬态分析的终止时间，默认为 $1\times10^{6}$。

GLOB：指定每一时间步的总体迭代数，默认为 20。

PRES：指定每一时间步的压力收敛准则，默认为 $1\times10^{-6}$。

TEMP：指定每一时间步的温度收敛准则，默认为 $1\times10^{-6}$。

OVER：指定结果文件的覆盖频率 (每隔 Value 个时间步覆盖一次)，默认为 0，即不覆盖

APPE： 指定结果的输出频率(每隔 Value 个时间步输出一次 结果到结果文件中)，默认为 $1\times10^{6}$。

SUMF：指定结果总结的输出频率(每隔 Value 个时间步输出一次结果总结)，默认为 $1\times10^{6}$

BC：指定瞬态边界条件的变化形式，默认为阶跃变化。

2）功能：基于时间步来设置瞬态分析的输出控制。

命令：FLDATA4A, STEP, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

其中，Lable 选项及其各自含义如下：

OVER：指定结果文件的覆盖频率(每隔 Value 个时间步覆盖一次)，默认为 0，即不覆盖。

APPE：指定结果的输出频率(每隔 Value 个时间步输出一次 结果到结果文件中)，默认为 10。

SUMF：指定结果总结的输出频率(每隔 Value 个时间步输出一次结果总结)，默认为 10。

在点取上面的菜单路径时，首先会弹出如图 3-6 所示的对话框，该对话框的第二项即是激活上面的第二条命令，即用户需要选择到底是基于瞬态分析的时间值、时间步长，还是二者兼顾来对求解及输出进行控制。同时，该对话框的第一项是用以定义到底是由程序还是由用户自己来对瞬态分析的时间步长进行控制，也就是下面将要讲到的 STEP 项。这两个选项的值直接影响了随后的弹出菜单的内容。

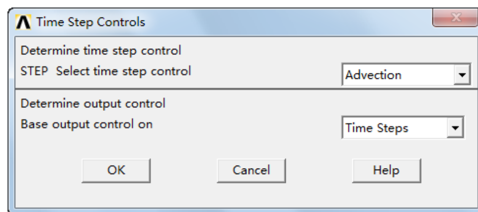



图 3-6 时间步长控制设置

图 3-7 和图 3-8 所示为该第二个命令的菜单形式。图 3-7 为用户自定义时间步长，

图 3-8 为程序定义时间步长（上述对话框的第一项设定），同时，它们所显示的都是设定由时间值和时间步同时控制求解及输出选项时（上述对话框的第二项设为“both”）的菜单情况。

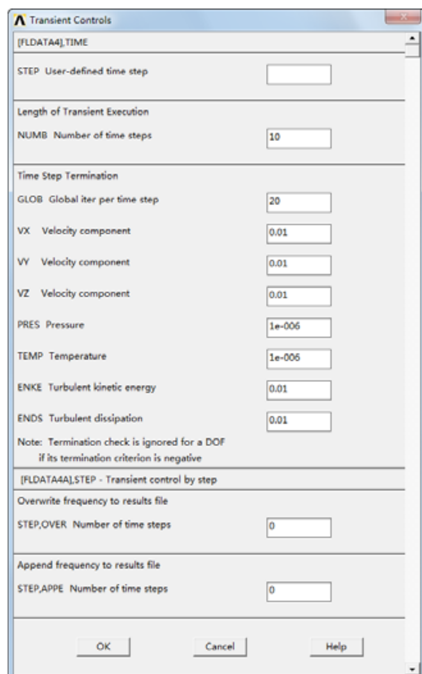



图 3-7 用户自定义步长的瞬态控制参数设置

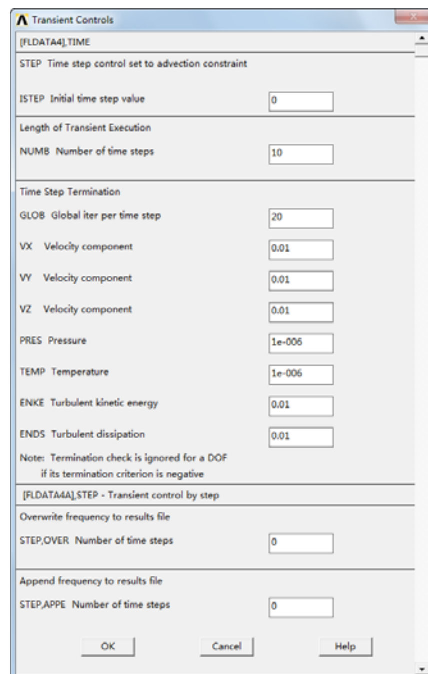



图 3-8 程序定义时间步长的瞬态控制参数设置

## 3.5.4 FLOTRAN 输出及保存文件控制

功能：设置输出及保存文件控制。

命令：FLDATA5, OUTP, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Additional Out→Print Controls

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Additional Out→RFL Out Derived

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Additional Out→RFL Prop Based

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Additional Out→Residual File

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Additional Out→Print Controls

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Additional Out→RFL Out Derived

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Additional Out→RFL Prop Based

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Additional Out→Residual File

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

DEBG：控制输出到调试文件 Jobname.DBG 中的信息，其 Value 有如下值可选：

0：不输出调试信息；

1：每一总体迭代步的初始和最终信息；

2：每一总体迭代步的完整信息；

3：输出总体系数矩阵 (不建议用该值，因其占用存储空间很大)；

4：输出总体系数矩阵和每一总体迭代的其他附加量(不建议使用该值，因其硬盘占用量极大)。

该 Lable 的菜单形式如图 3-9 所示。

PTOT：输出总压，默认为“Yes”。

TTOT：输出总温，默认为“No”。

HFLU：输出热通量，默认为“No”。

HFLM：输出对流传热系数，默认为“No”。

STRM：输出流线函数，默认为“Yes”。

PCOE：输出压力系数，默认为“No”。

MACH：输出马赫数，默认为“No”。

YPLU：输出 y+，默认为“No”。

TAUW：输出壁面切应力，默认为“No”。－"。

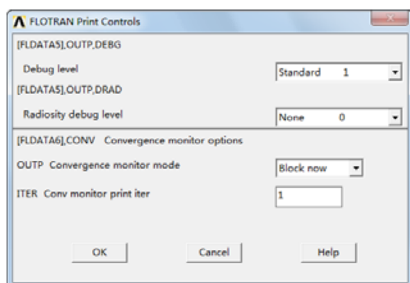



图 3-9 FLOTRAN 收敛监测控制

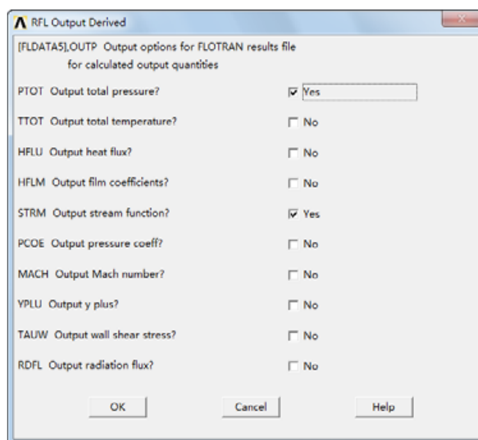



图 3-10 RFL 输出控制选项

DENS：输出层流密度，默认为“No”。

SPHT：输出比热容，默认为“No”。

VISC：输出层流粘度，默认为“No”。

COND：输出层流导热系数，默认为“No”。

EVIS：输出有效粘度，默认为“Yes”。

ECON：输出有效导热系数，默认为“Yes”。

该 Lable 的菜单形式如图 3-11 所示。

RESI：控制是否生成残差文件 Jobname.RDF，默认为“No”。

该 Lable 的菜单形式如图 3-12 所示。

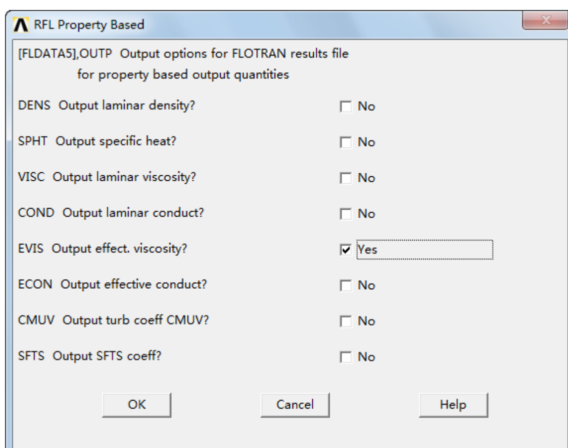



图 3-11 RFL 基本属性设置

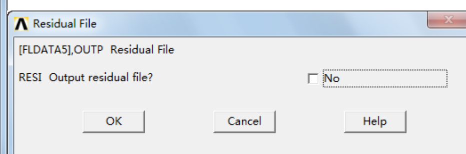



图 3-12 残差文件控制

## 3.5.5 FLOTRAN 输出收敛监测量的控制

功能：控制收敛监测量的输出。

命令：FLDATA6, CONV, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Additional Out→Print Controls

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Additional Out→Print Controls

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

OUTP：控制收敛监测量的显示模式，可用 Value 值有 LAND、BLOC 或 BNOW，默认为 BNOW 模式。

ITER：当 OUTP 为 LAND 或 BLOC 时，控制每隔 n 次迭代打印收敛监测参数，默认 n 为 1。

Value 的各值含义如下：

LAND：所有自由度都以水平模式打印输出(Lable=OUTP 时有效)。

BLOC：所有自由度都以条状模式打印输出(Lable=OUTP 时有效)。

BNOW：当一个迭代完成时， 所有自由度都立即以条状模式打印输出(Lable=OUTP 时有效)。

该命令的菜单形式如图 3-13 所示。

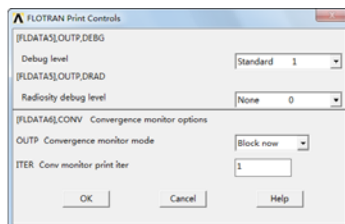



图 3-13 FLOTRAN 收敛监测控制

### 3.5.6 FLOTRAN 流体类型及其特性的可变性控制

1）功能：定义流体类型。

命令： FLDATA7, PROT, Lable, Value 或 FLDATA12, PROT, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

DENS：指定流体密度类型，默认为常值。

VISC：指定流体粘度类型，默认为常值。

COND：指定流体导热系数类型，默认为常值。

SPHT：指定流体比热容类型，默认为常值。

Value 为流体性质的类型，有如下值：

CONSTANT：性质为常值。

GAS：气体性质。

LIQUID：流体性质。

TABLE：由材料性质表输入(MPTEMP 和 MPDATA 命令)。

POWL：非牛顿流的 Power Law 粘度类型。

CARR：非牛顿流的 Carreau 粘度类型。

BING：非牛顿流的 Bingham 粘度类型。

USERV：用户自定义粘度类型(通过用户子程序 USERVISLAW 实现)。

AIR：国际单位制的空气性质。

AIR_B：国际单位制的空气性质，其计算密度时的压力为参考压力。

AIR-SI：国际单位制的空气性质。

AIR-SI_B：国际单位制的空气性质，其计算密度时的压力为参考压力。

AIR-CM：厘米-克-秒制的空气性质。

AIR-CM_B：厘米-克-秒制的空气性质，计算密度时的压力为参考压力。

AIR-MM：毫米-克-秒制的空气性质。

AIR-MM_B：毫米-克-秒制的空气性质，计算密度时的压力为参考压力。

AIR-FT：英尺-斯-秒值的空气性质。

AIR-FT_B：英尺-斯-秒值的空气性质，其计算密度时的压力为参考压力。

AIR-IN：英寸-(磅-秒 $^2$/英寸)-秒制空气性质。

AIR-IN_B：英寸-(磅-秒 $^2$/英寸)-秒制空气性质，其计算密度时的压力为参考压力。

CMIX：多组分流体质量比。

USER：用户自定义流体性质。

2）功能：控制流体特性是否可变。

命令：FLDATA13, VARY, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

DENS：指定流体密度是否变化，默认为否。

VISC：指定流体粘度是否变化，默认为否。

COND：指定流体导热系数是否变化，默认为否。

SPHT：指定流体比热容是否变化，默认为否。

这两条命令的菜单形式如图 3-14 所示。

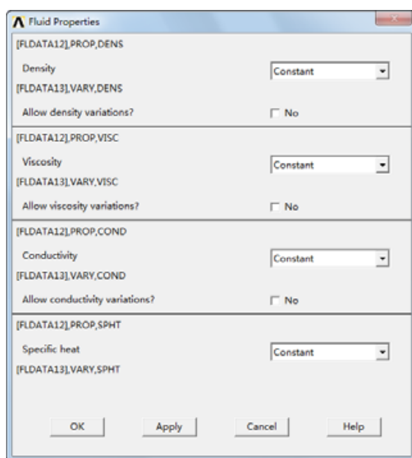



图 3-14 流体属性设置

## 3.5.7 FLOTRAN 流体性质参数设定

4.5.6 节中介绍的各种不同的流体类型，其特性的定义是不一样的，如 CONSTANT、GAS、LIQUID 等流体性质就分别需要定义其性质的名义项、 第一参数项、第二参数项、第三参数项等，然后利用这些项通过各自特定的公式来拟合流体性质，定义这些项的命令如下：

1）功能：定义流体性质方程的名义项参数。

命令：FLDATA8, NOMI, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

2）功能：定义流体性质方程的第一参数项。

命令：FLDATA9, COF1, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

3）功能：定义流体性质方程的第二参数项。

命令：FLDATA10, COF2, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

4）功能：定义流体性质方程的第三参数项。

命令：FLDATA11, COF3, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

DENS：指定密度特性的各参数项。

VISC：指定粘度特性的各参数项。

COND：指定导热系数特性的各参数项。

SPHT：指定比热容特性的各参数项。

这些命令的菜单形式如图 3-15 所示(该图只显示了 LIQUID 性质系数的定义，其他性质流体的性质系数的定义与此类似)。

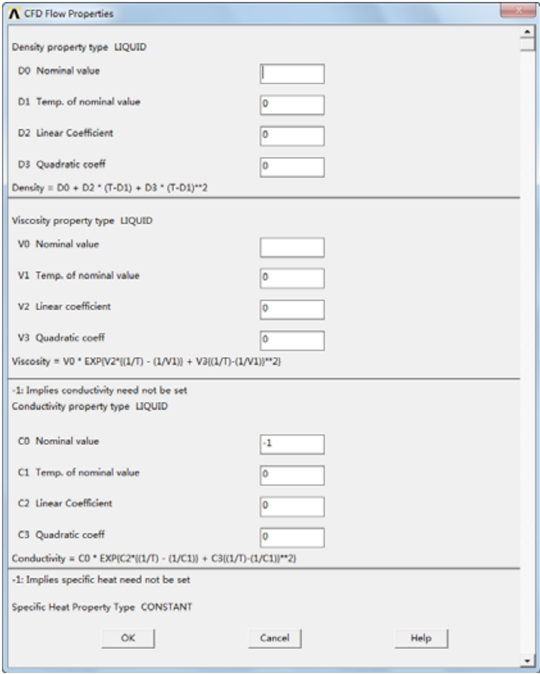



图 3-15 CFD 流体属性设置

### 3.5.8 FLOTRAN 分析的坐标系统的指定

功能：设定 FLOTRAN 单元的分析坐标系

命令：KEYOPT, 1, 3, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→FLOTRAN Coor Sys

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→FLOTRAN Coor Sys

其中，对于平面分析(141 单元)。Value 的值及其含义如下：

0：笛卡尔直角坐标系(此为默认值)。

1：绕 X 轴轴对称。

2：绕 Y 轴轴对称。

3：极坐标系。

对于三维分析(142 单元)Value 的值及其含义如下：

0：笛卡尔直角坐标系(此为默认值)。

3：柱坐标系。

该命令的菜单形式如图 3-16 和图 3-17 所示。

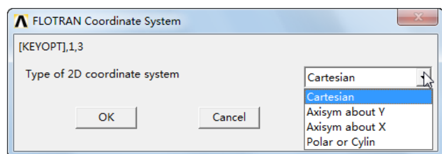



图 3-16 二维分析的 FLOTRAN 坐标系设置

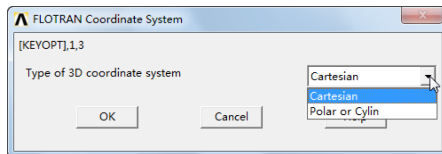



图 3-17 三维分析的 FLOTRAN 坐标系设置

## 3.5.9 FLOTRAN 分析参考条件的设置

1）功能：设定参考温度。

命令：FLDATA14, TEMP, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Condintions

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Condintions

其中，Label 的选项及其各自含义如下：

NOMI：指定初始温度，默认为 293。

BULK：指定用于计算传热系数的环境温度，默认为 293。

TTOT：指定用于可压缩绝热流分析的总温(滞止温度)。

2）功能：设定参考压力，默认值为 1.0135×105。

命令：FLDATA15，PRES，REFE，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Condintions

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Condintions

3）功能：设定体积模数，默认值为 $1\times101^5$。

命令：FLDATA16, BULK, BETA, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Condintions

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Condintions

4）功能：指定比热容，默认为 1.4。

命令：FLDATA17, GAMM, COMP, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref

Condintions

Main Menu → Solution → FLOTRAN Set Up → Flow Environment → Ref Condintions

5）功能：指定当前温度系统(如摄氏度)的零度与热力学温度系统零度间的差值

命令：TOFFST, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Condintions

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Condintions

这些命令的菜单形式如图 3-18 所示。

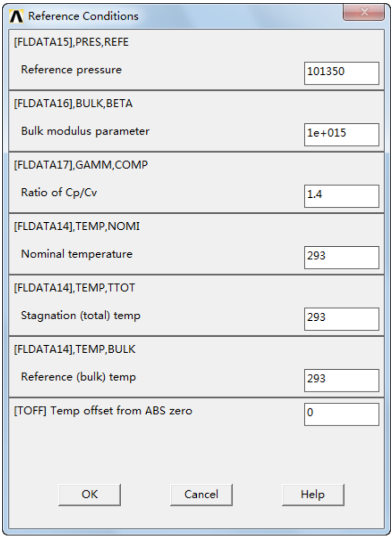



图 3-18 参考条件设置

## 3.5.10 指定 FLOTRAN 分析的旋转坐标系统

1）功能：指定关于总体坐标系原点的旋转速度。

命令：CGOMGA, CGOMX, CGOMY, CGOMZ

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Rotating Coords

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Rotating Coords

其中，CGOMX：关于总体坐标系 X 轴的旋转速度。

CGOMY：关于总体坐标系 Y 轴的旋转速度。

CGOMZ：关于总体坐标系 Z 轴的旋转速度。

2）功能：指定加速度坐标系的原点。

命令：CGLOC, XLOC, YLOC, ZLOC

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Rotating Coords

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Rotating Coords

其中，XLOC：加速度坐标系原点在总体笛卡尔坐标系中的 X 坐标值。

YLOC：加速度坐标系原点在总体笛卡尔坐标系中的 Y 坐标值。

ZLOC：加速度坐标系原点在总体笛卡尔坐标系中的 Z 坐标值。

以上两条命令的菜单形式如图 3-19 所示。

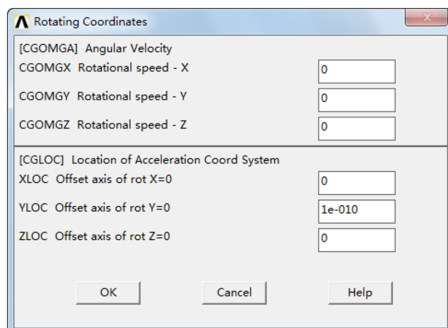



图 3-19 旋转坐标系设置

## 3.5.11 指定 FLOTRAN 分析的重力加速度

功能：指定 FLOTRAN 分析的重力加速度。

命令：ACEL, ACELX, ACELY, ACELZ

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Gravity

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Gravity

其中，ACELX：沿加速度坐标系 X 轴方向上的加速度值。

ACELY：沿加速度坐标系 Y 轴方向上的加速度值。

ACELZ：沿加速度坐标系 Z 轴方向上的加速度值。

该命令的菜单形式如图 3-20 所示。

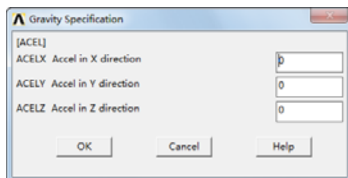



图 3-20 重力加速度设置

## 3.5.12 设置有助于 FLOTRAN 求解稳定的参数

功能：设置有助于求解稳定的参数。

命令：FLDATA26, STAB, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability

Parms

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

MOME：指定动量惯性松弛因子，默认为 $1\times10^{15}$。

PRES：指定压力惯性松弛因子，默认为 $1\times10^{15}$。

TEMP：指定能量惯性松弛因子，默认为 $1\times10^{20}$。

TURB：指定湍流惯性松弛因子，默认为 $1\times10^{15}$。

VISC：指定人工粘度，默认为 0。

该命令的菜单形式如图 3-21 所示。

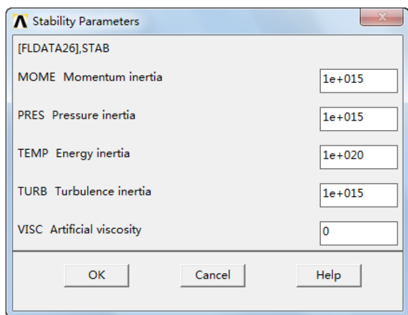



图 3-21 稳定参数设置

## 3.5.13 设定 FLOTRAN 自由度松弛因子

功能：设定自由度松弛因子，以助于收敛。

命令：FLDATA25, RELX, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

VX：指定 X 方向速度松弛因子，默认为 0.5。

VY：指定 Y 方向速度松弛因子，默认为 0.5。

VZ：指定 Z 方向速度松弛因子，默认为 0.5。

PRES：指定压力松弛因子，默认为 0.5。

TEMP：指定温度松弛因子，默认为 0.8。

ENKE：指定湍流松弛因子，默认为 0.5。

ENDS：指定湍流耗散率松弛因子，默认为 0.5。

该命令的菜单形式如图 3-22 所示。

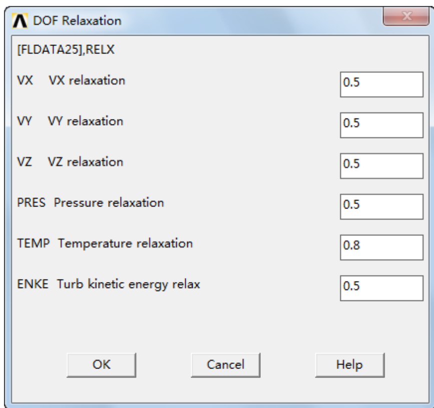



图 3-22 自由度松弛因子设置

## 3.5.14 设定 FLOTRAN 流体性质松弛因子

功能：设定流体性质松弛因子，以助于收敛。

命令：FLDATA25, RELX, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Prop Relaxation Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Prop Relaxation

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

DENS：设定密度松弛因子，默认为 0.5。

SPHT：设定比热容松弛因子，默认为 1.0。

VISC：设定粘度松弛因子，默认为 0.5。

COND：设定导热系数松弛因子，默认为 0.5。

EVIS：设定有效粘度系数松弛因子，默认为 0.5。

ECON：设定有效导热系数松弛因子，默认为 0.5。

该命令的菜单形式如图 3-23 所示。

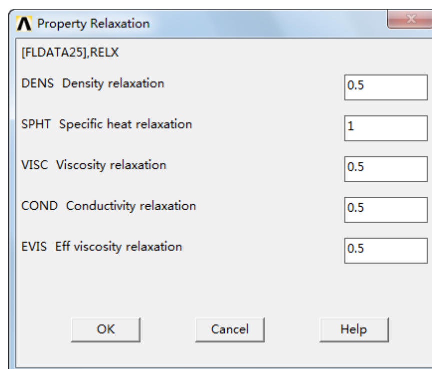



图 3-23 流体性质松弛因子设置

## 3.5.15 设置 FLOTRAN 分析的自由度限值

功能：设置自由度变量的限值以防出现不合理结果。

命令：FLDATA31, CAPP, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Results Capping

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Results Capping

其中，Lable 的选项及其各自含义如下：

VELO：控制是否加速度限值，默认为否。

TEMP：控制是否加温度限值，默认为否。

PRES： 控制是否加压力限值，默认为否。

UMIN：指定 X 方向速度的最小限值，默认为$-1\times10^{20}$。

UMAX：指定 X 方向速度的最大限值，默认为 $1\times10^{20}$。

VMIN：指定 Y 方向速度的最小限值，默认为$-1\times10^{20}$。

VMAX：指定 Y 方向速度的最大限值，默认为 $1\times10^{20}$。

WMIN：指定 Z 方向速度的最小限值，默认为$-1\times10^{20}$。

WMAX：指定 Z 方向速度的最大限值，默认为 $1\times10^{20}$。

TMIN：指定温度的最小限值，默认为$-1\times10^{20}$。

TMAX：指定温度的最大限值，默认为 $1\times10^{20}$。

PMIN：指定压力的最小限值，默认为$-1\times10^{20}$。

PMAX：指定压力的最大限值，默认为 $1\times10^{20}$。

该命令的菜单形式有两个，如图 3-24 和图 3-25 所示。

## 3.5.16 选择 FLOTRAN 各自由度相应的求解器

功能：选择每个自由度的解算方法。

命令：FLDATA18, METH, Lable, Value

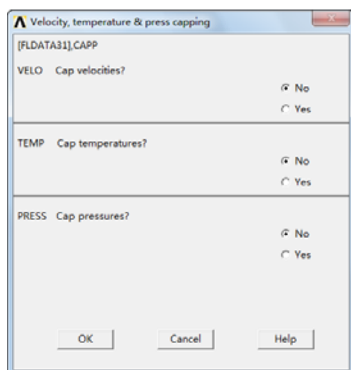



图 3-24 速度、温度和压力限值



图 3-25 设置限值

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENDS Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

ain Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENDS Solver CFD

其中，Lable 的选项及其各自的含义如下：

VX：指定 X 方向速度求解器，默认为 TDMA（三对角矩阵法）。

VY：指定 Y 方向速度求解器，默认为 TDMA（三对角矩阵法）。

VZ：指定 Z 方向速度求解器，默认为 TDMA（三对角矩阵法）。

PRES：指定压力求解器，默认为 PCRM（预条件共轭残差法）。

TEMP：指定温度求解器，默认为 TDMA（三对角矩阵法）。

ENKE：指定湍流动能求解器，默认为 TDMA（三对角矩阵法）。

ENDS：指定湍流动能耗散率求解器，默认为 TDMA（三对角矩阵法）。

Value 的值及其含义如下：

0：不求解该自由度的方程。

1：使用三对角矩阵法（TDMA，作为除压力外其他所有自由度的默认求解器）。

2：使用共轭残差法（CRM，该方法为半直接迭代求解法）。

3：使用预条件共轭残差法（PCRM，该方法为半直接迭代求解法）。

4：使用预条件广义最小残差法（PGMR）。

该命令的菜单形式如图 3-26 所示（在此只显示了 VX 的菜单，其他自由度的菜单与此类似）。

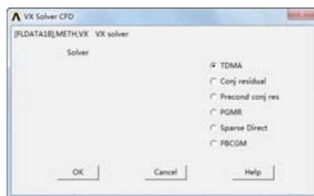



图 3-26 CFD 的 VX 解法设置

## 3.5.17 对 FLOTRAN 各求解器的控制

1）功能：指定各自由度用 TDMA 法求解时的迭代数（推进步数）

命令： FLDATA19, TDMA, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENDS Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENDS Solver CFD

其中，Lable 的选项及其各自的含义如下：

VX：指定 X 方向速度 TDMA 法推进步数，默认为 1。

VY：指定 Y 方向速度 TDMA 法推进步数，默认为 1。

VZ：指定 Z 方向速度 TDMA 法推进步数，默认为 1。

PRES：指定压力 TDMA 法推进步数，默认为 100。

TEMP：指定温度 TDMA 法推进步数，默认为 100。

ENKE：指定湍流动能 TDMA 法推进步数，默认为 10。

ENDS：指定湍流动能耗散率 TDMA 法推进步数，默认为 10。

Value 即为上述推进步数（迭代数）。



该命令只有 PRES、TEMP、ENKE、ENDS 四项能通过菜单达到，因若改变了速度项的推进步数默认值，通常会引起求解不稳定。

2）功能：指定共轭方向搜索矢量的个数，适用于 CRM 和 PCRM 求解器。

命令：FLDATA20，SRCH，Label，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENDS Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENDS Solver CFD

其中，Lable 的选项及其各自的含义如下：

VX：指定 X 方向速度方程共轭方向搜索矢量的个数。

VY：指定 Y 方向速度方程共轭方向搜索矢量的个数。

VZ：指定 Z 方向速度方程共轭方向搜索矢量的个数。

PRES：指定压力方程共轭方向搜索矢量的个数。

TEMP：指定温度方程共轭方向搜索矢量的个数。

ENKE：指定湍流动能方程共轭方向搜索矢量的个数。

ENDS：指定湍流动能耗散率方程共轭方向搜索矢量的个数。

Value 即为上述搜索矢量的个数。对于 CRM 法，其默认值都是 2；而对于 PCRM 法，其默认值则都为 12，且不允许少于 12。



只有当选用了 CRM 或 PCRM 法作为求解方法时，该命令的菜单才会出现。

3）功能：定义各自由度的收敛准则，适用于 CRM 和 PCRM 求解器。

命令：FLDATA21，CONV，Label，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENDS Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENDS Solver CFD

其中，Lable 的选项及其各自的含义如下：

VX：定义 X 方向速度方程的求解收敛准则，默认为 $1\times10^{-5}$。

VY：定义 Y 方向速度方程的求解收敛准则，默认为 $1\times10^{-5}$。

VZ：定义 Z 方向速度方程的求解收敛准则，默认为 $1\times10^{-5}$。

PRES：定义压力方程的求解收敛准则，默认为 $1\times10^{-7}$。

TEMP：定义温度方程的求解收敛准则，默认为 $1\times10^{-7}$。

ENKE：定义湍流动能方程的求解收敛准则，默认为 $1\times10^{-5}$。

ENDS：定义湍流动量耗散率方程的求解收敛准则，默认为 $1\times10^{-5}$。



对于 PGRM 求解器，默认的收敛值为 $1\times10^{-10}$，且不能小于 $1\times10^{-14}$。只有选用了 CRM 或 PCRM 法作为求解方法时，该命令的菜单才会出现。

4）功能：定义半直接迭代求解法（即 CRM 法和 PCRM 法）的最大迭代数。

命令：FLDATA22，MAXI，Lable，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENDS Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls ENDS Solver CFD

其中，Lable 的选项及其各自的含义如下：

VX：定义 X 方向速度方程的半直接法求解迭代数，默认为 100。

VY：定义 Y 方向速度方程的半直接法求解迭代数，默认为 100。

VZ：定义 Z 方向速度方程的半直接法求解迭代数，默认为 100。

PRES：定义压力方程的半直接法求解迭代数，默认为 500。

TEMP：定义温度方程的半直接法求解迭代数，默认为 500。

ENKE：定义湍流动能方程的半直接法求解迭代数，默认为 100。

ENDS：定义湍流动能耗散率方程的半直接法求解迭代数，默认为 100。


只有当选用了 CRM 或 PCRM 法作为求解方法，该命令的菜单才会出现。

5）功能：指定求解器最小的归一化变化率，适用于 CRM 和 PCRM 求解器。

命令：FLDATA23，DELT，Label，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENDS Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VX Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VY Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→VZ Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENKE Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→ENDS Solver CFD

其中，Lable 的选项及其各自的含义如下：

VX：定义 X 方向速度方程求解器最小的归一化变化率，默认为 $1\times10^{-10}$。

VY：定义 Y 方向速度方程求解器最小的归一化变化率，默认为 $1\times10^{-10}$。

VZ：定义 Z 方向速度方程求解器最小的归一化变化率，默认为 $1\times10^{-10}$。

PRES： 定义压力方程求解器最小的归一化变化率，默认为 $1\times10^{-10}$。

TEMP：定义温度方程求解器最小的归一化变化率，默认为 $1\times10^{-10}$。

ENKE：定义湍流动能方程求解器最小的归一化变化率，默认为 $1\times10^{-10}$。

ENDS：定义湍流动能耗散率方程求解器最小的归一化变化率，默认为 $1\times10^{-10}$。


只有当选用了 CRM 或 PCRM 法作为求解方法，该命令的菜单才会出现。

由于对于上面每条命令而言，其菜单形式在各个自由度下都极其类似，故在此仅以

温度自由度作为示范来显示以上各命令的菜单形式。

第一条命令（FLDATA19）的菜单形式如图 3-27 所示。

第二、三、四、五条命令（FLDATA20、FLDATA21、 FLDATA22、 FLDATA23）的菜单形式如图 3-28 所示。

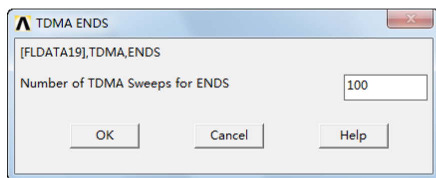



图 3-27 指定迭代步数



图 3-28 求解控制设置

### 3.5.18 设置 FLOTRAN 湍流模型的一些常数

功能：设置湍流分析时所用湍流模型的一些常数。

命令：FLDATA24, TURB, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Turbulence→Turbulence Parameters

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Turbulence→Turbulence Parameters



该命令有三项子功能：设置湍流模型常数、设置湍流入口常数、设置湍流 Schmidt 数。

其中：设置湍流模型常数子功能 Lable 的选项及其各自的含义如下：

CMU：定义 k-ε湍流模型常数 $\mu_t$，默认值为 0.09。

C1：定义 k-ε湍流模型常数 C1，默认值为 1.44。

C2：定义 k-ε湍流模型常数 C2，默认值为 1.92。

KAPP：定义壁面律常数，默认值为 0.4。

EWLL：定义壁面律常数，默认值为 9.0。

VAND：定义 Van Driest 壁面传热模型常数，默认值为 26.0。

BUC3：定义 k-ε浮力模型常数，默认值为 0.0。

BUC4：定义用于 k-ε湍流动能方程浮力项的乘子，默认为 0.0。

WALL：选定壁面导热模型。

BETA：定义用于 k-ε模型浮力项的热膨胀系数β。

TRAN：定义 y+的幅值，仅用于平衡壁面模型，默认值为 11.5。

设置湍流入口常数子功能 Lable 的选项及其各自的含义如下：

ININ：　定义入口湍流强度，默认为 0.01。

INSF：　定义入口尺度因子，默认为 0.01。

RATI：　定义湍流比，默认为 1000。

设置湍流 Schmidt 数子功能 Lable 的选项及其各自的含义如下：

SCTM：定义动量的 Schmidt 数，默认值为 1.0。

SCTT： 定义温度的 Schmidt 数，默认值为 1.0。

SCTK： 定义湍流动能的 Schmidt 数，默认值为 1.0。

SCTD： 定义湍流动能耗散率的 Schmidt 数，默认值为 1.3。

设置湍流模型常数的菜单形式如图 3-29 所示。

设置湍流入口常数和湍流 Schmidt 数的菜单形式如图 3-30 所示。

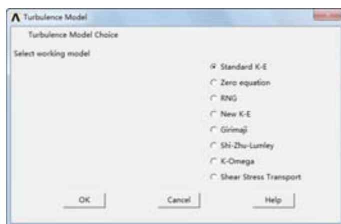



图 3-29 湍流模型设置

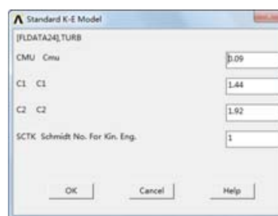



图 3-30 湍流参数设置

## 3.5.19 重新设定 FLOTRAN 各分析参数的值

1）功能：定义是否要重新设定 FLOTRAN 各分析参数的值。

命令：FLDATA28, MODR, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Mod Res/Quad Ord→Modify Results

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Mod Res/Quad Ord→Modify Results

2）功能：重新设定 FLOTRAN 各分析参数的值。

命令：FLDATA29, MODV, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Mod Res/Quad Ord→Modify Results

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Mod Res/Quad Ord→Modify Results

其中，Lable 的选项及其各自的含义如下：

VX：重新将整个模型的 X 方向速度设为一均值。

VY：重新将整个模型的 Y 方向速度设为一均值。

VZ：重新将整个模型的 Z 方向速度设为一均值。

PRES：重新将整个模型的压力设为一均值。

TEMP：重新将整个模型的温度设为一均值。

ENKE：重新将整个模型的湍流动能设为一均值。

ENDS：重新将整个模型的湍流动能耗散率设为一均值。

DENS：重新将整个模型的密度设为一均值。

VISC：重新将整个模型的粘度设为一均值。

COND：重新将整个模型的导热系数设为一均值。

EVIS：重新将整个模型的有效粘度设为一均值。

ECON：重新将整个模型的有效导热系数设为一均值。

TTOT：重新将整个模型的总温设为一均值。

SPHT：重新将整个模型的比热容设为一均值。

另外，FLDATA29 命令还有其他 3 个用于多组分疏运分析的 Lable，其名称及含义如下：

SP0n：重新设定第 n（n＝1～6）组分的质量份额。

LMDn：重新设定第 n（n＝1～6）组分的层流质量扩散系数。

EMDn：重新设定第 n（n＝1～6）组分的有效质量扩散系数。



只有当在 FLDATA28 的相应菜单中将某变量的 Value 设为“是”后，才会在 FLDATA29 命令的菜单中显示出该变量的 Lable，以允许修改该变量的值。

第一条命令（FLDATA28）的菜单形式如图 3-31 所示，第二条命令（FLDATA29）的菜单形式如图 3-32 所示。



图 3-31 FLOTRAN 重新设置参数选项

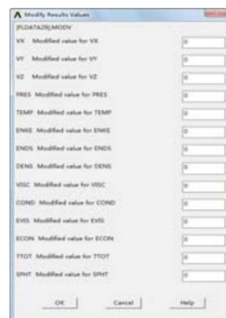


图 3-32 重新设置参数值

## 3.5.20 控制 FLOTRAN 面积积分的阶次(Quadrature Order)

功能：控制面积积分的阶次，亦即积分点的个数。

命令：FLDATA30, QUAD, Lable, Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Mod Res/Quad Ord→CFD Quad Orders

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Mod Res/Quad Ord→CFD Quad Orders

其中，Lable 的选项及其各自的含义如下：

MOMD：控制动量扩散项的面积积分阶次，默认为 0 点积分。

MMOS：控制动量源项的面积积分阶次，默认为 0 点积分。

PRSD：控制压力扩散项的面积积分阶次，默认为 1 点积分。

PRSS：控制压力源项的面积积分阶次，默认为 1 点积分。

THRD：控制热扩散项的面积积分阶次，默认为 0 点积分。

THRS：控制热源项的面积积分阶次，默认为 0 点积分。

TRBD：控制湍流扩散项的面积积分阶次，默认为 0 点积分。

TRBS：控制湍流源项的面积积分阶次，默认为 2 点积分。

Value 即上述积分点的数目，各值含义如下：

0：单点面积积分，但积分所用的是扩散系数的平均值。

1：单点面积积分。

2：两点面积积分。



程序总会将积分点数目设为最优值，例如，对于轴对称分析以及极坐标下的分析，积分点数目会自动设为 2。另外，当单元畸形时，使用 2 点积分有助于提高精度。

该命令的菜单形式如图 3-33 所示。

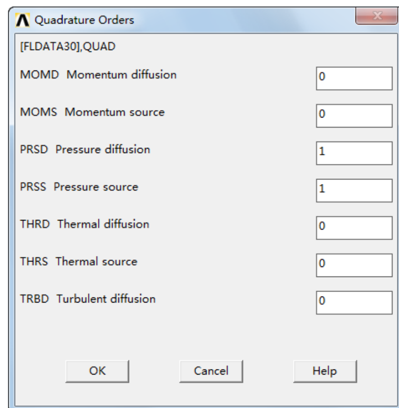


图 3-33 面积积分的阶次设置

### 3.5.21 FLOTRAN 多组分疏运分析的设置及控制

1）功能：设定组分数目，Value 的值介于 1～6 之间。

命令：KEYOPT，1，1，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

2）功能：设定施加在所有组分上的多组分数据。

命令：MSDATA，ALGEB，UGAS

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

其中：

ALGEB：设定一特定组分号，该组分的质量分数等于 1.0 减去其他所有组分质量分数之和，如此以保证总的质量分数为 1.0。其默认值为 2。

UGAS：设定大气常数，默认为 8314.3（国际单位制）。

以上两条命令的菜单形式如图 3-34 所示。

3）功能：设定各组分的名字、相对分子质量以及 Schmidt 数。

命令：MSSPEC, SPNUM, Name, MOLWT, SCHMIDT

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

其中：

SPNUM：组分号，介于 1～6 之间

Name：该组分的名字(1～4 个字符，不能与已存在的自由度的符号相同),默认为 SP0n，n 为组分号。

MOLWT：该组分的分子量，只适用于气体(由 MSPROP 命令定义)。

SCHMIDT：该组分的 Schmidt 数，只适用于气体(由 MSPROP 命令定义)。

4）功能：定义多组分单元的面积积分阶次。

命令：MSQUAD, QDIF, QSRC

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

其中：

QDIF：扩散项面积积分的阶次，其值及含义如下：

0：单点积分（此为默认值）。

1：与 0 相似，只是在计算与温度相关的流体性质时，所使用的温度是分布温度（而不是平均值）。

2：两点积分（作为轴对称分析时的默认值）。

QSRC：源项面积积分的阶次，其值及含义如下：

0：单点积分（此为默认值）。

1：与 0 相似，只是在计算与温度相关的流体性质时，所使用的温度是分布温度（而不是平均值）。

2：两点积分（作为轴对称分析时的默认值）。

5）功能：定义各组分名义质量份额的初始值。

命令：MSNOMF, SPNUM, FRACTION

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

其中：

SPNUM：组分号，介于 1～6 之间。

FRACTION：该组分在整个分析区域内的初始质量分数，默认值为 1/n。所有组分的该值之和应为 1.0。

上面三条命令的菜单形式如图 3-35 所示。

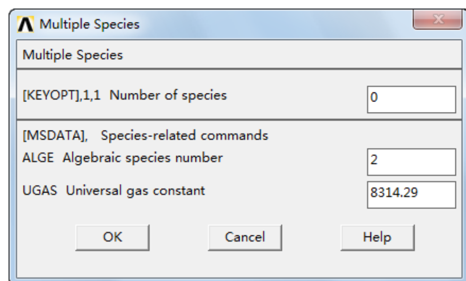



图 3-34 多组分设置

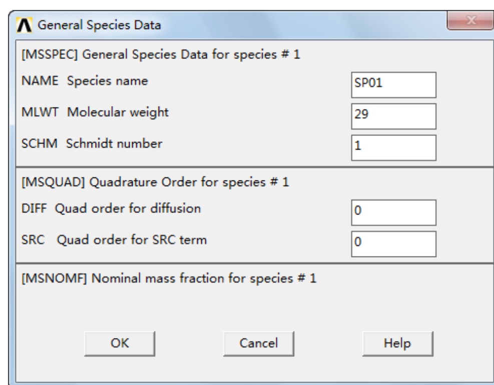



图 3-35 多组分参数设置

6）功能：指定多组分疏运方程的求解方法。

命令：MSMETH, SPNUM, KEY

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

其中：

SPNUM：组分号，介于 1～6 之间（必须定义）。

KEY：定义多组分疏运方程的求解方法，其值及其含义下：

0：不对该组分的方程进行求解。

1：三对角矩阵法（TDMA 法，此为默认值）。

2：共轭残差法（Conj residual）。

3：预条件共轭残差法 （Precond conj res）。

4：预条件广义最小残差法 （GMRES/precond）。

该命令的菜单形式如图 3-36 所示。

7）功能：定义所组分疏运分析的求解选项。

命令：MSSOLU, SPNUM, NSWEEP, MAXI, NSRCH, CONV, DELMAX

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

其中：

SPNUM：组分号，介于 1～6 之间（必须定义）。

NSWEEP：TDMA 算法的推进步数，只对 TDMA 算法有效，默认为 100。

MAXI：半直接算法的 最大迭代数，只适用于共轭残差法、预条件共轭残差法和预条件广义最小残差法，默认为 100。

NSRCH：半直接算法的搜索向量个数，默认为 2。

CONV：半直接算法的收敛准则，默认为 $1.0\times10^{-5}$。

DELMAX：半直接算法的最小归一化变化率，默认为 $1.0\times10^{-9}$。

针对不同的算法，该命令的菜单形式有如图 3-37 或图 3-38 所示。

8）功能：定义多组分分析的松弛因子。

命令：MSRELEX, SPNUM, CONC, MDIF, EMDI, STAB

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

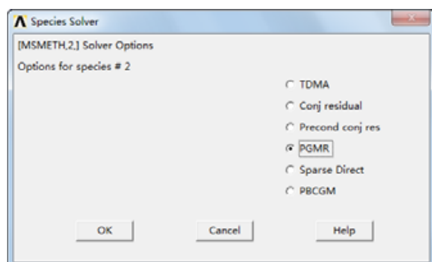



图 3-36 组分求解器设置

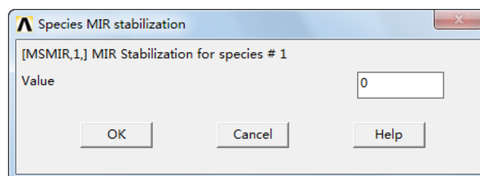



图 3-37 TDMA 算法设置

其中：

SPNUM：组分号，介于 1～6 之间（必须定义）。

CONC：定义集中松弛因子，默认为 0.5。

MDIF：定义质量扩散系数的松弛因子，默认为 0.5。

EMDI：定义有效质量扩散系数的松弛因子，默认为 0.5（仅用于湍流）。

STAB：定义求解传输方程的惯性松弛因子，默认为 $1.0\times10^{20}$。

该命令的菜单形式如图 3-39 所示。

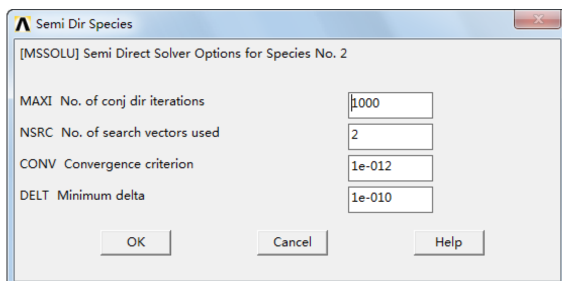



图 3-38 组分设置

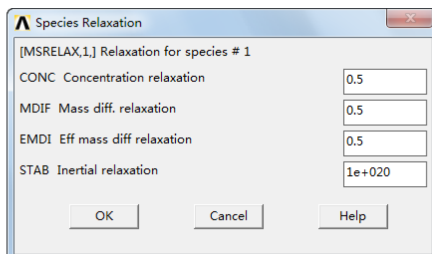



图 3-39 多组分松弛因子设置

9）功能：定义各组分流体的性质。

命令：MSPROP, SPNUM, Lable, Type, NOMINAL, COF1, COF2, COF3

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

其中：

SPNUM：组分号，介于 1～6 之间（必须定义）。

Lable：用以确定到底要定义流体的哪一项性质，其值有：

DENS：定义密度。

VISC：定义粘度。

COND：定义传热系数。

MDIF：定义质量扩散系数。

SPHT：定义比热容。

Type：用以确定流体性质的类型，其值有：

CONSTANT ：流体性质为恒值(即不随温度而变，此为默认值)。

LIQUID：流体性质为液体。

GAS：流体性质为气体。

NOMINAL： 所定义流体性质的名义值。

COF1： 与流体性质的名义值相对应的温度。

COF2： 流体性质随温度变化方程中的第一系数项。

COF3： 流体性质随温度变化方程中的第二系数项。




不同的流体，FLOTRAN 中规定其性质随温度变化的方程如下：

对于性质为恒值（ CONSTANT）的流体，其性质方程为

Lable＝NOMINAL

对于性质为液体（LIQUID）的流体，其性质方程为

DENS＝NOMINAL+COF2*(T-COF1)+COF3*$(T\text{-}COF1)^2$

其他 Lable＝NOMINAL* e [COF2*(1/T-1/COF1)+COF3*$(1/T\text{-}1/COF1)^2$]

对于性质为气体（GAS）的流体，其性质方程为

DENS＝NOMINAL*(P/COF2)/(T/COF1)

其他 Lable＝ NOMINAL*$(T/COF1)^{1.5}$*(COF1+COF2)/(T+COF2)

式中，P 为所计算节点处的压力；T 为所计算节点处的温度。

10）功能：确定各组分流体性质在总体迭代之间是否可变。

命令：MSVARY, SPNUM, Lab, Key

命令：MSPROP, SPNUM, Lable, Type, NOMINAL, COF1, COF2, COF3

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

其中：

SPNUM：组分号，介于 1～6 之间（必须定义）。

Lab：用以确定到底要使流体的哪一项性质具有可变性，其值有：

DENS：流体密度。

VISC：流体粘度。

COND：流体传热系数。

MDIF：流体质量扩散系数。

Key：流体性质在总体迭代之间是否可变的开关，其值有：

OFF：不允许改变（此为默认值）。

ON：允许改变




针对不同的流体性质，以上两条命令的菜单形式基本上是一样的，在此仅将密度性质的定义菜单显示于下，如图 3-40 所示。

11）功能：激活并定义各组分质量分数的限值。

命令：MSCAP, SPNUM, Capkey, UPPER, LOWER

命令：MSPROP, SPNUM, Lable, Type, NOMINAL, COF1, COF2, COF3

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

其中：

SPNUM：组分号，介于 1～6 之间（必须定义）。

Capkey：激活质量分数限值的开关，其值为：

OFF：不对该组分的质量分数进行限值，此为默认值。

ON： 要对该组分的质量分数进行限值。

UPPER： 质量分数限值的上限，默认为 1.0（当 Capkey＝ON 时有效）。

LOWER：质量分数限值的下限，默认为 0.0（当 Capkey＝ON 时有效）。

该命令的菜单形式如图 3-41 所示。

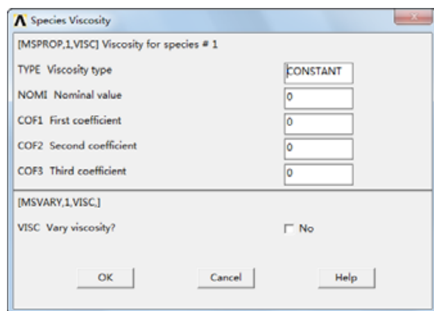



图 3-40 组分密度设置

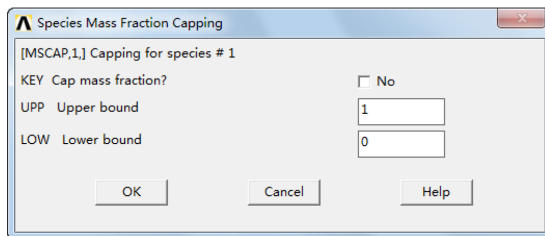



图 3-41 组分质量分数设置

### 3.5.22 定义 FLOTRAN 的重启动（续算）控制

功能：控制重启动选项。

命令：FLDATA32, REST, Lable, Value, Value2

其中，Value、Value2 为下述的重启动位置或重启动标志[是(T)或否(F)]。

Lable：重启动选项，其值有：

1）NSET：定义将结果文件 Jobname.RFL 中的某个结果解集(Set)号作为重启动的起始点。Value 即为该解集号，当 Value=0 或为空时，程序将结果文件中的最后一个解集作为重启动的起始点(默认值)。该 Lable 的菜单路径如下：

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Restart Options→Restart/Set

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Restart Options→Restart/Set

2）ITER：定义将结果文件 Jobname.RFL 中的某个累积迭代数作为重启动的起始点。Value 即为该累积迭代数，当 Value=0 或为空时，程序将结果文件中的最后一个解集作为重启动的起始点(默认值)。该 Lable 的菜单路径如下：

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Restart Options→Restart/Iteration

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Restart Options→Restart/Iteration

3）LSTP：定义将结果文件 Jobname.RFL 中的某个载荷步和子步号作为重启动的起始点。Value 即为该载荷步号，Value2 即为该子步号，当 Value=0 或为空时，程序将结果文件中的最后一个解集作为重启动的起始点(默认值)。该 Lable 的菜单路径如下：

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Restart Options→Restart/Load Step

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Restart Options→Restart/Load Step

4）TIME：定义将结果文件 Jobname.RFL 中的某个瞬态时间作为重启动的起始点。Value 即为该时间值，当 Value=0 或为空时，程序将结果文件中的最后一个解集作为重启动的起始点(默认值)。该 Lable 的菜单路径如下：

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Restart Options→Restart/Time

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Restart Options→Restart/Time

这 4 个 Lable 的菜单形式极其类似，在此将 NSET 的菜单形式显示如图 3-42 所示。

RFIL：定义是否读入 CFD 数据结构重启动文件 Jobname.CFD 以用于重启动分析。其 Value 为“是(T)”或“否(F)”，若将其设为 T，则下面的 WFIL 项将在程序内部被设为 F。其默认值为 F。

WFIL：定义是否将 CFD 数据结构写入重启动文件 Jobname.CFD。其 Value 为“是(T)”或“否(F)”，若将其设为 T，则上面的 RFIL 项将在程序内部被设为 F。其默认值为 F。这两个 Lable 的菜单路径如下：

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Restart Options→CFD Restart File

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Restart Options→CFD Restart File

这两个 Lable 的菜单形式如图 3-43 所示。

OVER：定义是否覆盖作为重启动位置的那个解集，其值有：

-1：要覆盖该解集（Overwrite）。

1：保留该解集（Save）。

0：只有当该解集为一个收敛解时才保留（No Tag，此为默认值）

该 Lable 的路径菜单如下：

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Restart Options→Tag set status

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Restart Options→Tag set status

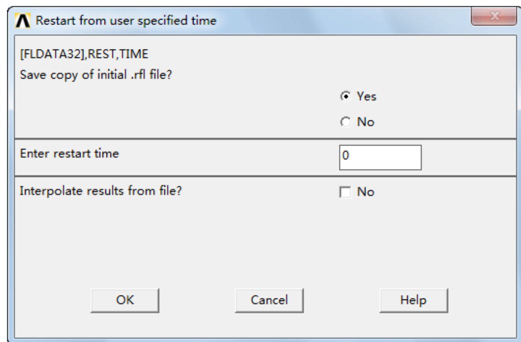



图 3-42 重启动设置

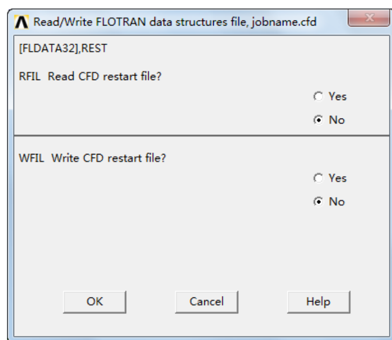



图 3-43 读入或写入 CFD 数据结构重启动文件设置

该 Lable 的菜单形式如图 3-44 所示。

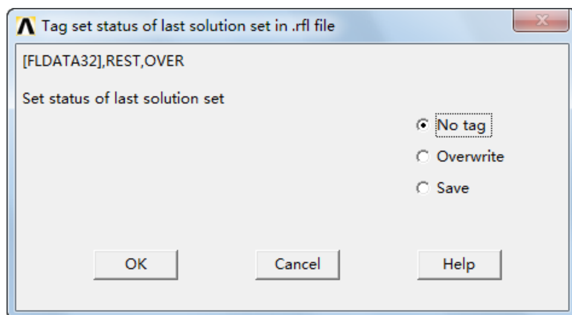



图 3-44 重启动文件设置

### 3.5.23 设置并执行一个零迭代 FLOTRAN 分析

功能：生成第 0 次迭代或当前迭代的结果总结，以便于检查边界条件和流体性质的设置。

命令：FLOCHECK, Key

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flocheck

其中，Key 的值及其含义如下：

0：不执行零次迭代 （但会生成当前迭代的结果总结，此为默认值）。

1：执行零次迭代（生成第 0 次迭代的结果总结）。

该命令的菜单形式如图 3-45 所示。

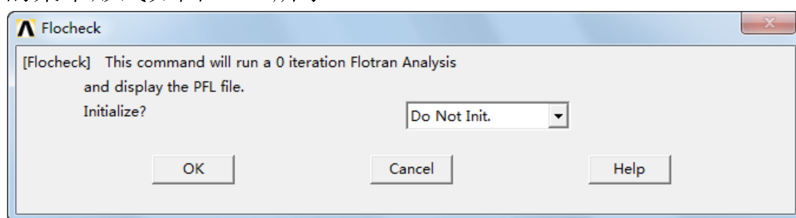



图 3-45 Flocheck 设置

第 4 章

# FLOTRAN CFD 求解器和矩阵方程

本章介绍了 FLOTRAN CFD 的求解器和矩阵方程。在序列求解算法中，对于自由度的求解方程组有三种算法：三对角矩阵算法、半直接共轭方向法和高斯消去法。

本章详细介绍了各种算法的设置方法以及注意事项。

学习要点

- 了解 FLOTRAN 的求解算法
- 了解 FLOTRAN 求解器的设置方法

在序列求解算法中，对于自由度的求解方程组有三种选择：

（1）一个快速的、恰当的求解器　这个求解器即运用三对角线运算法则（TDMA）执行通过问题区域的用户定义的迭代数。

（2）“精确”求解器　“精确”方法为半直接共轭方向方法，它重复一个确定的收敛性判别准则。

这些方法为：非对称矩阵方程的共轭残差(CR)、预条件共轭残差(PCCR)、预条件广义最小残差(PGMR)，以及预条件 BiCGStab (PBCGM) 方法。

（3）稀疏直接求解器　这个求解器使用高斯消去来分解矩阵，然后使用后向/前向替换两个求解未知量。

可以通过以下方法选择每个 DOF 的方法：

命令：FLDATA18,METH,Label,Value (Label = DOF)

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD

有效选项为：1（TDMA）、2（共轭残差）、3（预条件共轭残差或梯度）、4（预条件广义最小残差）、5（稀疏直接）或 6（预条件 BICGStab）。0 选项表面方程组不会被求解。预条件共轭梯度方法会自动对选项 2 或 3 应用不可压缩压力方程。

速度和湍流方程的默认求解器（TDMA）适用于实际上遇到的每个问题。速度的扫掠（迭代）数为 1，不要改变这个值。经验表明湍流方程扫掠数为 10 时最有效。

一般说来，压力方程的解必须精确，且使用共轭方向方法。然而，对于自然对流流动来说，TDMA 方法是可行的。

## 4.1 三对角矩阵算法

使用以下方法来设置 TDMA 求解器的扫掠数：

命令：FLDATA19,TDMA,Label,Value (Label = DOF)

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

在菜单中，除非对 DOF 要求使用 TDMA 方法，否则就不必使用这个命令。

# 4.2 半直接求解

在残差内积求解过程中可以通过行为测量半直接求解器的性能，被称为 RTR(对于不可压缩压力方程为 ZTR)。在整体迭代到一个分数的过程中，RTR 应该是减小的。

此分数为半直接方法的收敛性判别准则，用以下方法进行设置：

命令：FLDATA21,CONV,Label,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

为了设置整体迭代过程中允许的最大迭代数，可选择以下方法：

命令：FLDATA22,MAXI,Label,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

对于使用的每个 DOF，一般为 PRES 或 TEMP，或两者都使用，关于半直接求解器如何执行的数据出现在文本文件 Jobname.DBG 中。

半直接算法可以推导出三种不同的方式：得到收敛；没有收敛，但得到了最大迭代数；求解已停止。

如果没有收敛，但得到了最大迭代数，就会要求更多的迭代（例如，在一个大的或病态问题中）。如果是这样的话，就增加最大迭代数。如果将收敛性判别准则设为一个非常小的值（例如，小于 $1.0\times10^{-15}$），也可以得到最大收敛数。在这种情况下，迭代收敛准则应该减弱了。然而，这也意味着解是发散的，如果是这样的话，调试文件中会出现较大的 RTR 或 ZTR 值（可能大于 $1.0\times10^{20}$），此时增加迭代数就没有用了。

当新的迭代没有朝解的方向进行，而没有达到收敛性判别准则时，就会停止。如果变化率足够小，求解过程就会停止。



可以通过使用以下方法确定导致求解器中止的变化率：

命令：FLDATA23,DELT,Label,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

Label 引用了正在求解的 DOF。求解可压缩压力方程时或求解某些共轭传热问题的温度方程时，可能会发生停止。RTR 的值没有明显地减小，且在最后迭代处，DelMax 的值小于确定的值。这就意味着基本上解不会改变了，进一步的计算也是多余的。

通过增加搜索方向的数目或者使用惯性松弛可以解决停止的问题。为了增加搜索方向，可以使用上述菜单路径之一（用 FLDATA23,DELT 命令），或者使用以下命令：

命令：FLDATA20，SRCH，Label，Value

默认值为 2，适用于良态问题。需要的搜索方向数在不同的问题中变化很大。20 的值可能会用到，但是要注意到确定的每个搜索方向在内存中需要 N 个计算存储位置（在问题中 N 为有限元节点数）。对于较大的 SRCH 值，需要的计算存储可能会超过可用的计算机资源，在这种情况下应该会用到惯性松弛。

### 4.2.1 预条件广义最小残差（PGMR）求解器

当构造 L 和 U 分解矩阵时 PGMR 方法要使用替代物。PGMR 方法即广义最小残差方法，它使用一个 LU 预条件来把方程系数转换成容易求解的方程组。用 PCCR 方法把系数矩阵分解为一个近似的 LU 乘积。在 PCCR 方法中，原矩阵的稀疏形式保存在 L 和 U 矩阵中。因此，使用 PGMR 求解器时，需要确定替代物的数目，也必须确定搜索矢量的数目。

替代物的值代表了 L 和 U 分解矩阵的每一行所允许的多余单元的数目。多余单元定义为除了原矩阵的行中的非零单元数以外的单元。

有两个 PGMR 算法可用于 FLOTRAN，程序会自动做出选择，差别取决于“替代物”，它是必需的，且仅适用于 PRES 和 TEMP 自由度。

为了确定替代物的数量，可使用这些方法中的任意一个：

命令：FLDATA20A,PGMR,Label,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

替代物允许的范围为 1～10，默认值为 6。对于所有能应用的 DOF 要输入一个单一的替代物的值。

对于某些问题，没有必要得到一个能量方程的每个整体迭代步的精确解。为了节约一些时间，可以通过一个 MODP 标签使用上述命令。

### 4.2.2 预条件 BICGStab(PBCGM)求解器

PBCGM 方法即广义双共轭梯度方法，它使用了通过把系数矩阵及其实转置矩阵相互正交构造的两组矢量。在每步迭代中，在实转置矩阵的基础上首先产生一个与某些用户确定的先前的矢量（搜索方向）正交的新矢量，然后就使用一个最小限度方案来稳定计算方案。与 PGMR 相似的是，PBCGM 方法在构造 L 和 U 分解矩阵时使用了替代物。通过把系数分解成一个近似的 LU 乘积，这个预条件方案将方程系数转换成易于求解的方程组。

相应地，当使用预条件 BICGStab(PBCGM)求解器时，需要确定替代物的数量，也

必须确定搜索矢量数。

替代物值表示了 LU 分解矩阵每行中所允许的多余元素的数目。多余元素可定义为除了原矩阵行中非零元素数以外的元素。

有两种 PBCGM 算法可用于 FLOTRAN，差异取决于替代物值。当这个值确定为 0 时，除了 LU 预条件部分外算法是平行的。

为了确定替代物的数量，可使用以下的命令或菜单：

命令：FLDATA20B,PBCGM,Label,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

替代物的许用范围为 0～10，默认值为 6，对于所有可应用的 DOF 都输入一个单一的替代物值。

问题中需要使用的搜索方向数变化范围大。如果大的 SRCH 值导致需要的计算机存储超过了计算机资源，就要使用惯性松弛。实际上，为了节约存储空间，一般应使用值 1 或 2。为了确定搜索矢量数，可使用以下命令或菜单：

命令：FLDATA20,SRCH,Label,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→desired DOF solver

对于 PBCGM 求解器，搜索矢量的许用范围为 1～8，默认值为 2。

## 4.3 稀疏直接求解

稀疏直接求解方法存储能力强，只有当所有其他的方法失败时才能使用它。这种方法在矩阵因数分解过程中会产生中间文件，并且很难预测需要的内存。对于中间文件需要确保存在足够的存储空间。

如果对于 VX，VY 或 VZ 自由度选择了稀疏直接方法，FLOTRAN 就会重新把方法设为 PCCR。稀疏直接方法不适用于速度自由度。

# 第 5 章

# 不可压缩流动 FLOTRAN 分析及实例

湍流流动状态是工程设备中常见的一种流态。虽然湍流的理论和实验研究有了很大的进展，但是至今尚未达到完全成熟的阶段。

本章主要是层流和湍流不可压缩流动 FLOTRAN 分析，不仅从理论上作了简单的分析，也给出了多个工程实例，以方便读者更深刻地理解。

## 学 习 要 点

- 了解如何激活湍流模型、划分网格、设置边界条件等
- 通过实例理解 FLOTRAN 分析的原理及方法

# 5.1 激活湍流模型

层流和湍流的区别在于流体微团惯性力与粘性力比例的不同。随着这个比例因子的增加，流动会不稳定，速度也会出现波动。通过方程中的有效粘度，湍流模型可以解释波动的影响。有效粘度是层流粘度和湍流粘度之和。层流粘度是流体的基本属性，湍流粘度可以通过湍流模型计算出来。

## 5.1.1 雷诺数

流体力学中雷诺数表征粘性影响的相似准数，记做 $Re$。

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V L_c}{\mu}$$

这是一个无量纲量，$\rho$ 和 $\mu$ 分别为流体密度和粘度，$V$ 为流场的平均速度，$L_c$ 为流场的特征长度。

对于内流问题，流场的特征长度为水力直径，管子的水力直径就是管子的直径。对于管道内的流动问题，当雷诺数超过 2300 时，就应被激活湍流模型。

对于外流问题，流场的特征长度一般取物体的主要尺寸，如机翼弦长或圆球直径。

## 5.1.2 层流和湍流的判断

在分析之前，首先要判断流动是层流还是湍流。如果流体流动形态判断错误，将会造成很严重的后果。

如果流动形态是湍流，但是没有激活湍流模型，那么分析的结果会出现很大的偏差。在这种情况下，动量和压力的收敛值将接近 1，粘度和压力的值将会变大。有些情况下，如果几何特征不会影响流动，没有激活湍流模型也会收敛。一般来说，流体流动都保留层流的一些特征。

相反，如果流动形态是低雷诺数的层流，但是激活了湍流模型，那么湍流模型会得出较低的有效粘度。如果最后平均有效粘度低于有效粘度的 5 倍并且高于层流粘度，那么应该在没有激活湍流模型的情况下重新运行。

## 5.1.3 湍流比和入口参数

需要注意的是，当开始计算分析时，有效粘度会初始化为多个层流的值（也叫湍流比）。无论湍流模型有没有被激活有效粘度都会被初始化。默认的湍流比是 1000，这是大多数湍流分析得出的合理值。可以用以下方法来设置湍流比：

命令：FLDATA24，TURB，RATI，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Turbulence→Turbulence Param

对入口处的于湍流动能（ENKE）和湍流动能耗散率（ENDS），二方程湍流模型需要设置边界条件。如果入口处的条件已知，则可以设置 ENKE 和 ENDS，否则必须设置入口强度（ININ）和入口比例因子（INSF）。ININ 和 INSF 的默认值是 0.01。

可以利用以下方法设置入口强度和入口比例因子：

命令：FLDATA24，TURB，ININ，Value

FLDATA24，TURB，INSF，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Turbulence→Turbulence Param

### 5.1.4 湍流模型

FLOTRAN 分析提供了如下几种湍流模型：

1）标准 k-ε 方程湍流模型（默认）；

2）零方程湍流模型（ZeroEq）；

3）Re-Normalized Group 湍流模型（RNG）；

4）Shih k-ε 方程模型（NKE）；

5）Girimaji 非线性模型（GIR）；

6）Shih、Zhu、Lumley 模型（SZL）；

7）k-ω 方程湍流模型；

8）切应力输运模型（SST）。

可以利用以下方法激活湍流模型：

命令：FLDATA1，SOLU，TURB，T

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Solution Options

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Solution Options

可以利用以下方法选择以上模型：

命令：FLDATA24，TURB，MODL，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

通常情况下，标准 k-ε 方程湍流模型是首选模型。这种模型可以给出流动的模拟图像，非常适合管道和水渠中的湍流分析。然而，这种模型分析的波动值超出了预测值。例如，收敛喷嘴的流动承受很大的应变，标准 k-ε 方程湍流模型分析的波动值超出了预测值，由此引起动能超出了预测值。在某些情况下有效粘度可以防止冲击波的产生。

一般来说，在大应变区域，RNG、NKE、GIR 和 SZL 湍流模型明显会得出更合理可靠的结果。对于有强烈加速或减速流动的区域、有显著分离或在循环的区域的分析，以上湍流模型的可靠性和合理性更为明显。

k-ω 方程湍流模型的优势在于壁附近的分析，在壁附近可以准确地预测在逆压力方向的湍流长度。k-ω 方程湍流模型的自由流动湍流水平要比 k-ε 湍流模型更加敏感。SST 湍流模型在靠近壁的区域结合使用 k-ω 方程湍流模型，在远离壁的区域结合使用 k-ε 湍

流模型，可以克服两种模型的缺陷。

（1）标准 k-ε 方程湍流模型　零方程湍流模型和 k-ω 方程湍流模型是最简单的模型。其他模型是对标准 k-ε 方程湍流模型和 k-ω 方程湍流模型的扩展。标准 k-ε 方程湍流模型是默认的湍流模型。

可以利用以下方法选择标准 k-ε 方程湍流模型：

命令：FLDATA24，TURB，MODL，1

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

Cμ、C1、C2、SCTK 和 SCTD 是标准 k-ε 方程湍流模型的常数，可以利用以下方法设置标准 k-ε 方程湍流模型各个常数的值：

命令：FLDATA24，TURB，Label，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

KAPP、EWLL、WALL、VAND 和 TRAN 五个参数可以控制靠近壁的湍流模型，这些

参数适用于除零方程模型以外的所有模型。可以利用以下方法设置以上五个参数：

命令：FLDATA24，TURB，Label，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Wall Parameters

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Wall Parameters

BUC3、BUC4 和 BETA 三个参数控制着浮力模拟。这三个参数适用于除零方程模型以外的所有模型。可以利用以下方法设置以上 5 个参数：

命令：FLDATA24，TURB，Label，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Buoyancy Terms

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Buoyancy Terms

（2）零方程湍流模型（ZeroEq）　这是最简单的湍流模型，适用于相当简单的几何形状和流动特性的问题。如果有明显的分离和在循环，这个模型就不能给出准确的结果。

可以利用以下方法选择零方程湍流模型：

命令：FLDATA24，TURB，MODI，2

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

零方程湍流模型中的长度比例可以自动计算，也可以人为设置。一般来说，使用零方程湍流模型时，湍流比可以设置为 2.0。

（3）Re-Normalized Group 湍流模型（RNG）　当几何模型有很大的曲率时，RNG 湍流模型才是有效的，可以利用以下方法选择 RNG 湍流模型：

命令：FLDATA24，TURB，MODL，3

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

（4）Shih k-ε 方程模型（NKE）　NKE 湍流模型的变量 $C_\mu$ 有助于降低标准 k-ε 方

程湍流模型中额外应变项，与标准 k-ε 方程湍流模型相比，它采用了不同的源项功耗。NKE 湍流模型推荐用于旋转流动分析。可以利用以下方法选择 NKE 湍流模型：

命令：FLDATA24，TURB，MODL，4

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

（5）Girimaji 非线性模型（GIR）　用于流动中次要涡旋分析，GIR 湍流模型推荐用于旋转流动分析。可以利用以下方法选择 GIR 湍流模型：

命令：FLDATA24，TURB，MODL，5

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

（6）Shih、Zhu、Lumley 模型（SZL）　SZL 比 NKE 和 GIR 湍流模型简单，它分析最低水平的湍流流动。SZL 湍流模型的分析结果是准确的，但是某些情况下的低有效粘度会不利于分析的稳定。一般来说，如果 SZL 湍流模型不能得到满意的结果，则可以用 RNG 湍流模型。

如果流动中存在大应变的条件，可以在试用 RNG、NKE 和 GIR 湍流模型之后试用 SZL 湍流模型。如果 SZL 湍流模型得到明显不同的结果，则要重新划分湍流区域的网格。可以利用以下方法选择 GIR 湍流模型：

命令：FLDATA24，TURB，MODL，6

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

（7）k-ω 方程湍流模型　它是最简单的湍流模型之一，与标准 k-ε 方程湍流模型相比，它提供了更好的湍流边界层的模拟，但是对于自由流动湍流更为敏感。可以利用以下方法选择 k-ω 方程湍流模型：

命令：FLDATA24，TURB，MODL，7

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

（8）切应力输运模型（SST）　集结了标准 k-ε 方程湍流模型和 k-ω 方程湍流模型的优点，它能根据与壁的距离不同自动切换到 k-ω 方程湍流模型和标准 k-ε 方程湍流模型。可以利用以下方法选择 SST 模型：

命令：FLDA24，TURB，MODL，8

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Turbulence→Turbulence Model

## 5.2 网格要求

湍流的网格要求比层流严格得多。最重要的区域明显是那些较高梯度的区域，尤其是壁面附近的区域。

比起自由网格，结构网格在壁面处能提供更一致的表示。图 5-1 和图 5-2 比较了壁

面附近区域的结构网格和非结构网格。

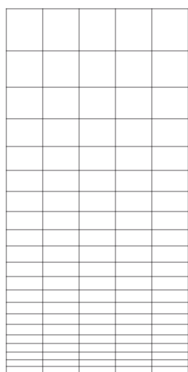


图 5-1 结构网格

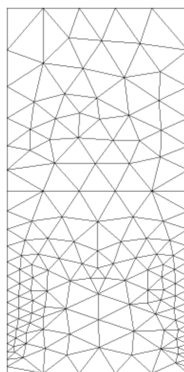


图 5-2 非结构网格

结构网格是由 MSHAPE,0,2D 和 MSHKEY,1 命令产生的。

非结构网格是由 MSHAPE,1,2D 和 MSHKEY,0 命令产生的。

可以评估壁面附近的网格是否足够。壁面附近采用湍流模型时要包括“壁面的对数定理”，即距离壁面 Y+的无量纲距离与壁面附近区域的无量纲速度的对数之间的关系。这个定理计算了一个壁面附近的速度，它与通过实验确定的壁面附近的速度分布相一致。Y+值仅对于壁面节点是相关的，并且可用于后处理（YPLU）。

最恰当的 Y+值大约位于 30～1000 之间。如果压力沿流动方向减小，高达 5000 的值是可以接受的。FLOTRAN 通过假设壁面附近的节点位于层流内层或交叠区域来处理 Y+＜30 时的情况。



要使用足够的单元求解重要区域的流场。要跨越细长通道的横截面就应使用至少 4 种单元。与较大区域相连的细通道处使用的单元应多于 4 种。

## 5.3 流动边界条件

流动区域的每个边界都需要处理。要确定下面列出的边界类型中的自由度（VX、VY、VX 和 PRES）的某种组合（如果适当的值是可用的，就可以确定入口处的湍动能（ENKE）和湍动能耗散率（ENDS））。如果在边界表面上没有施加条件，垂直于表面的所有因变量的导数则为零。

可使用以下方法设置节点处的自由度约束：

命令：D

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→boundary condition type

可以使用以下任一方法设置固体模型上的边界条件：

命令：DA 和 DL

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→boundary condition

type→On Areas

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→boundary condition type→0n Areas

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→boundary condition type→On Lines

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→boundary condition type→On Lines

这能够用一种不同的网格重新进行分析，而不要在一个节点基上施加边界条件。这些命令或菜单路径允许确定线段的端点或面的边上的条件。

要注意确保在相交边界处施加恰当的条件，还要控制是否在线段两端或面的边上施加了边界条件。线段端点或面的边上的一个非零速度分量并不会取代相关节点处已经存在的零速度条件。在壁面和入口相交处，会自动施加壁面条件。

如果将一个新的（和不同的）边界条件施加到一个具有有限元网格的固体模型上，就应该在传递新的载荷之前删除已经存在的节点边界条件。

**确定的流动**：要确定边界上所有的速度分量。使用这种方法来确定入口处的流动。要想知道入口处的质量流率就需要知道密度。

**确定的压力**：一般施加一个相对压力（通常为零）作为入口边界条件。不考虑重力和旋转参考系时，绝对压力为 FLOTRAN（相对）压力和参考压力之和。一个问题也可能是压力驱动的，在这种情况下，压力边界之一为入口。



如果边界附近计算出相当大的梯度，这时可能会出现质量不平衡。这是由恒定压力边界上充分发展流动的默认条件引起的。如果流动没有充分发展，FLOTRAN 就会沿单元的最后一行被迫调整以满足边界条件，这种调整偶尔会造成质量不平衡。

为了防止发生这种情况，可以在出口增加一个发展长度。其实这样增加不必与物理流动几何形状相匹配。可以减去这个“烟囱”中的压降以得到想要的压降。“烟囱”中的压降会沿它的横截面变化，因此不得不选择一个压降的代表值与想要的出口条件匹配。当然，直到检查完“烟囱”的结果之后才能知道这个压降。基于这些结果，可以选择将一个出口压力分布施加到原始几何图形上。

可以使用发展长度公式中的特征直径（$D$）计算需要的烟囱长度（$L$）：

层流：$L/D \sim 0.06\ Re$

湍流：$L/D \sim 4.4\ Re1/6$

具有代表性的 20～25 倍直径长的烟囱就已足够。尽管这个区域的网格有点粗糙，但是在烟囱中可以通过使用一个尺寸比以避免单元尺寸出现剧烈的变化。重要的特征就是烟囱长度，而不是它内部的节点数。

**对称边界**：垂直于边界的速度分量为零，剩下所有其他的自由度没有确定。

**广义对称边界**：也可以施加广义对称边界条件。如果 ALE 公式没有激活，就将速度分量设为与对称面相切；如果激活了 ALE 公式，就将其设为等于网格速度。可以利用以下方法施加广义对称边界条件：

D，NODE，ENDS，-1

DL，LINE，AREA，ENDS，-1，Value2

DA，AREA，ENDS，-1，Value2

有一种例外，如果在相同的边界处确定了任意一个速度分量，就会覆盖广义对称边界条件。在 2-D 旋转问题中，确定了一个速度分量 VZ 就不会覆盖广义对称条件。

**固定壁面**：也可以称为无滑移条件。所有速度分量都设为零。

**移动壁面**：指定速度分量与壁面相切，并将所有其他速度分量设为零。作为一个表明为移动壁面的标志，在移动壁面上将湍流动能设为-1，这种指定仅作为一个标志，并不影响壁面湍流模型的性能。如果正在使用 GUI，当确定速度时就表明是一个移动壁面。

**不确定边界**：在这种情况下，相对压力和速度都不知道。它最普遍的应用就是用于可压缩超音速流动中的下游边界处。

**周期边界**：两个边界上的条件虽不确定，但是相等。在一个边界处选择了节点后就发布宏 PERI、DX、DY、DZ，其中 DX，DY 和 DZ 为第二个边界偏离第一个边界的偏移量。将偏移量输入到已建立好的 FLOTRAN 坐标系中。两个边界处的网格必须保持一致。

**相交**：在表面相交处施加两种不同的边界条件，要么两个边界条件是合并的，要么其中一个优先于另一个。表 5-1 可以指导如何将边界条件施加到相交处。

表 5-1 相交处的边界条件

| 相交边界 1 | 相交边界 2 | 行为 |
|---|---|---|
| 内流:确定的 VX， VY， VZ | 壁面:VX， VY， VZ ＝ 0 | 壁面覆盖内流 |
| 内流:确定的 VX， VY， VZ | 对称:VX 或 VY 或 VZ ＝ 0 | 将内流与对称结合在一起 |
| 内流:确定的 VX， VY， VZ | 外流:P ＝ 0 | 强化内流条件，而不是外流 |
| 对称:VX 或 VY 或 VZ ＝ 0 | 对称:P ＝ 0 | 将对称与外流结合在一起 |
| 对称:VX 或 VY 或 VZ ＝ 0 | 壁面: VX， VY， VZ ＝ 0 | 壁面覆盖对称 |
| 壁面:VX， VY， VZ ＝ 0 | 外流:P ＝ 0 | 将壁面和外流条件结合在一起 |
| 广义对称 | 外流:P ＝ 0 | 将广义对称和外流条件结合在一起 |



内流、对称和壁面边界条件都会覆盖广义对称条件。

**入口值**：如何激活了湍流模型，则边界条件是必需的。ANSYS 提供了基于入口速度之上的默认值和一个比例因子。给定了一个入口速度大小 $V$，入口动能为

$$K_{inlet} = \frac{3}{2}\left[(\mathrm{ININ})V\right]^2$$

因数 ININ 的默认值为 0.01，对应于入口处 1%的湍流程度。动能耗散率 $\varepsilon$ 的入口值为

$$\varepsilon_{inlet} = \frac{C_\mu K^{\frac{3}{2}}}{(\mathrm{INSF})L}$$

INSF 值是一个用户控制的比例因子。可以利用以下方法确定因数 ININ 和 INSF：

命令：FLDATA24,TURB,ININ,Value

FLDATA24,TURB,INSF,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Turbulence→Turbulence Param

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Turbulence→Turbulence Param

有时候对于某种情况需要激活湍流模型，但是对于某些区域又不能激活。为了在区域中停用湍流模型，要将动能（ENKE）设为 0，将耗散率（ENDS）设为 1.0。不能将耗散率设为 0。若 ENKE 设为 0，ENDS 会设为 1.0。

**壁面粗糙度：**FLOTRAN 默认条件为光滑壁面。为了确定壁面粗糙度的值，必须使用平衡壁面湍流模型。使用 FLDATA24，TURB，WALL，EQLB 命令激活它。

为了将以长度为单位的均匀壁面粗糙度施加到所有壁面上，可以使用 FLDATA24，TURB，KS，Value 命令。除了规定了实际壁面粗糙度外，KS 参数还确定了壁面粗糙度的形式（光滑的、过渡的，或完全粗糙的）。默认值 0.0 意味着一个光滑的壁面。

也可以施加一个位于 0.5～1.0 之间的经验无量纲系数（CKS），它确定了表面的不均匀度。默认值 0.5 意味着用 KS 表示的壁面粗糙度是不均匀分布的。可以使用 FLDATA24，TURB，CKS，Value 命令来确定这个系数。

如果有需要不同壁面粗糙度值的表面，下面的两种方法是可用的。

第一种方法对于所有壁面单元利用了实常数。将合适的 KS 和 CKS 值作为实常数施加到壁面附近的单元。对于每一组壁面粗糙度都存在一个不同的实常数。需要注意的是，施加到没有接近壁面的单元上的壁面粗糙度常数可以忽略不计，而由 FLDATA24，TURB 命令确定的任意 KS 和 CKS 值也可以忽略不计。

第二种方法适用于大多数表面有相同的壁面粗糙度的情况。首先，通过 FLDATA24，TURB 命令设置适用于大多数表面的值。然后使用实常数将壁面粗糙度施加到具有不同条件的壁面上。实常数会覆盖 FLDATA24，TURB 值。值得注意的是，如果所有表面上施加相同的 CKS 值（这是典型的），可以通过 FLDATA24，TURB 命令控制，并且实常数可以忽略不计。

## 5.4 难点问题分析

FLOTRAN 分析中最常见的问题是压力场和速度场不收敛。下面的方法将有助于湍流不收敛问题的分析。

1）如果没有激活湍流选项，则需要激活湍流选项。可以利用以下方法来激活湍流模型：

命令：FLDATA1，SOLU，TURB，T

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Solution Options

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Solution Options

2）如果自由网格不能得到预想的结果，则可以使用映射网格。重新求解边界层为了 Y+的值小于 5000。可以利用以下方法设置 Y+输出选项：

命令：FLDATA5，OUTPUT，YPLU，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Additional Out→RFL Out Derived

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Additional Out→RFL Out Derived

3）设置湍流惯性松弛因子为 1.0。可以利用以下方法设置湍流惯性松弛因子：

命令：FLDATA26，STAB，TURB，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms

4）使用的压力和动量松弛因子应小于 0.5。可以利用以下方法设置压力和动量松弛因子：

命令：FLDATA25，RELX，PRES，Value

FLDATA25，RELX，VX（VY，VZ），Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation

5）应该以高湍流比开始问题的分析，高湍流比意味着高初始有效粘度。无论湍流模型有没有被激活，湍流比的设置都能控制初始有效粘度。可以利用以下方法设置压力和动量松弛因子：

命令：FLDATA24，TURB，RATI，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Turbulence→Turbulence Param

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Turbulence→Turbulence Param

6）初始化合适属性之后，可以求解高粘度问题，并且湍流模型可以关闭。当流场部分收敛时，湍流模型将会被激活。对于整体迭代，需要降低有效粘度的松弛因子到 0.1 或 0，可以使湍流方程部分收敛。

7）由于压力和温度的大幅度波动，属性的改变是个难点。防止分析时属性过早的变化可以使分析结果更稳定。可以设定速度上限来防止速度或压力出现大的波动。可以利用以下方法设定速度上限：

命令：FLDATA31，CAPP，Label，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Results Capping

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Results Capping

8）如果 FLOTRAN 显示消息指出系数矩阵具有负对角线并且求解是不收敛的，那么应该尝试激活动量方程或湍流方程的修正惯性松弛因子，一般设置在 0.1～1.0 之间。为使收敛速度更快，可以用尽可能小的值。可以利用以下方法设置湍流惯性松弛因子：

命令：FLDATA34，MIR，Label，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→MIR Stabilization

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→MIR Stabilization

## 5.5 问题描述

### 5.5.1 模型尺寸

这是一个空气在二维管道中流动的模型。图 5-3 给出了模型的形状和流体的流动方向。表 5-2 给出了模型的尺寸及空气的物理参数。用 ANSYS FLOTRAN 计算以下几种情况下管道内的流速分布、总压力分布、出口处的速度分布，并观察流体质点在管道内的流动轨迹。

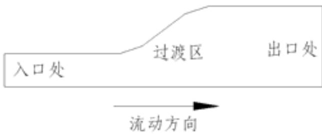



图 5-3 模型形状

表 5-2 模型的尺寸及空气的物理参数

| 性质 | 尺寸 | 性质 | 尺寸 |
|---|---|---|---|
| 入口管长度 | 4 in | 出口管增加长度 | 30 in |
| 入口管高度 | 1 in | 空气密度 | 1.21e-7 lb·$s^2/in^4$ |
| 过渡区长度 | 2 in | 空气粘度 | 2.642e-9lb·$s/in^2$ |
| 出口管高度 | 2.5 in | 入口速度 | 1 in/s |
| 出口管初始长度 | 4 in | 出口压力 | 0 psi |

### 5.5.2 理论假设

这个二维分析问题可以选用 FLOTRAN 单元（FLUID141）进行求解。这个问题可以分为以下 4 部分：

1）流入空气速度为 1in/s 的层流模型；

2）流入空气速度为 50in/s 的层流模型；

3）流入空气速度为 50in/s 的层流模型，出口管长度增加 30in；

4）流入空气速度为 50in/s，计算流动的雷诺数，更换湍流模型重新计算。

对于所有的求解，在入口处施加一个均匀的速度分布。在所有壁面上施加物滑移（零速度）条件（包括壁面与入口和出口相交处）。假定流体不可压缩，并且假定其性质为恒值，在这种情况下，压力就可只考虑相对值，因此在出口处施加的压力边界条件是相对压力为零。

第一次分析时，流动为层流（雷诺数小于 3000）。为计算内部管道流体流动的雷诺数，其公式如下

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu}$$


在二维几何图形中，水力直径为入口高度的两倍。

第二次分析时，将入口速度增加到 50 in/s（雷诺数相应增大）后再在第一次分析的基础上重启动求解。

第二次分析的流动图形表明，流动不是充分发展的，因此下一步应增加管道长度以得到更完整的图形。增加 30in 的管道长度，然后再重启动求解。

对于内流来说，当雷诺数达到 2000～3000 时，流动即由层流过渡到湍流，故对管道中的空气作最后一次分析时（雷诺数约为 4500），流动是湍流。对于最后一次分析，使用湍流模型开始求解。

## 5.6 2-D 管道流动分析（层流模型）

### 5.6.1 前处理

**01 定义工作文件名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“DUCT1”，并将“NEW log and error files”设置为“Yes”，如图 5-4 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

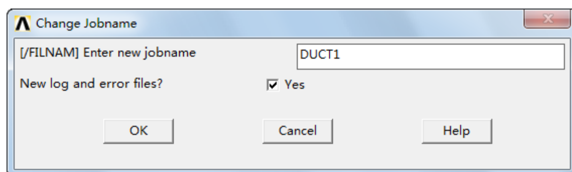



图 5-4 输入工作名对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Laminar Flow Analyses in a 2-D Duct”，如图 5-5 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸设置参数选择：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 5-6 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit Delete，会弹出“Element Types”对话框，如图 5-7 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

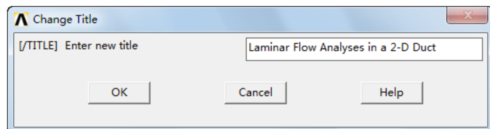



图 5-5 “Change Title”对话框

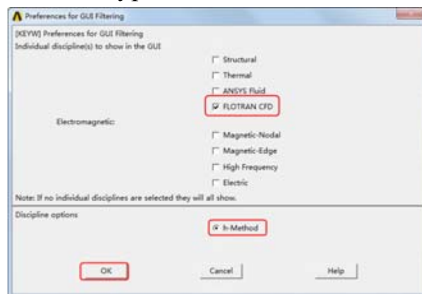



图 5-6 “Preferences for GUI Filtering”对话框

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD 和 2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”文本框中输入 1，如图 5-8 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

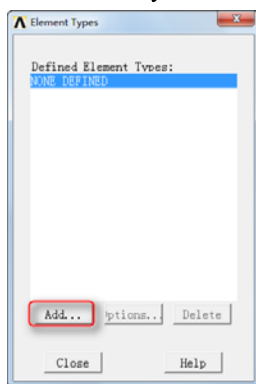



图 5-7 “Element Types”对话框

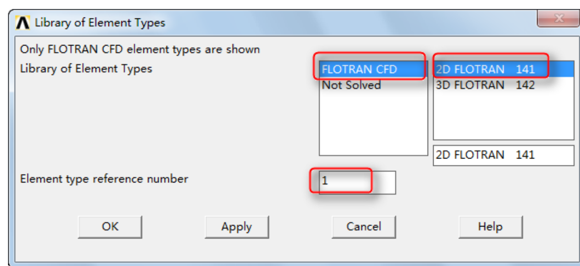



图 5-8 “Library of Element Types”对话框

❹单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

**03 建立几何模型。**

❶建立入口处矩形面模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 5-9 所示。

❷在“Create Rectangle by Dimensions”对话框中，依次输入 X1=0、X2=4 和 Y1=0、Y2=1，如图 5-9 所示。

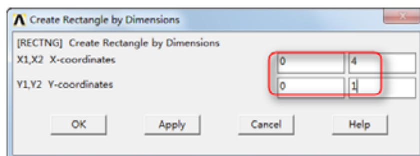



图 5-9 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

❸单击“Apply”按钮，继续建立出口处矩形面模型。在 Create Rectangle by Dimensions 对话框中，依次输入 X1=6、X2=10 和 Y1=0、Y2=2.5。

❹单击“OK”按钮，关闭“Create Rectangle by Dimensions”对话框。单击“SAVE_DB”保存。

❺建立过渡线模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines 命令，弹出“拾取”对话框，如图 5-10 所示。

❻拾取入口矩形（左边）的上边界，单击“OK”按钮。拾取入口矩形（左边）的上边界的右端点，单击“OK”按钮。

❼拾取出口矩形（右边）的上边界，单击“OK”按钮。拾取出口矩形（右边）的上边界的左端点，单击“OK”按钮。会生成一条光滑连接入口和出口的曲线，如图 5-11 所示。单击“OK”按钮，退出拾取对话框。

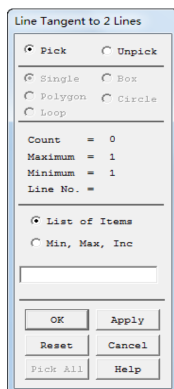



图 5-10 “ 拾取”对话框

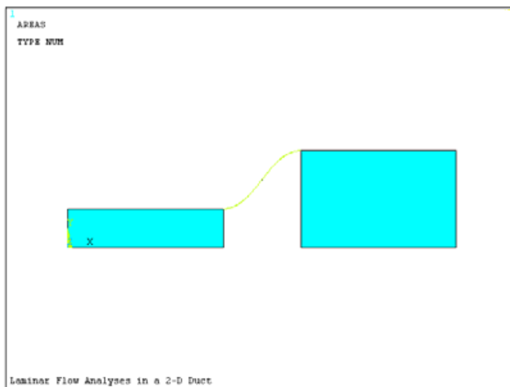



图 5-11 连接入口和出口的曲线

❽建立过渡面模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，会弹出“拾取对”话框，如图 5-12 所示。拾取入口矩形的右边两个关键点和出口矩形的左边两个关键点，单击“OK”按钮，生成过渡面模型，如图 5-13 所示。

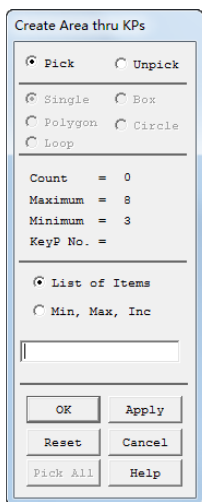



图 5-12 “拾取”对话框

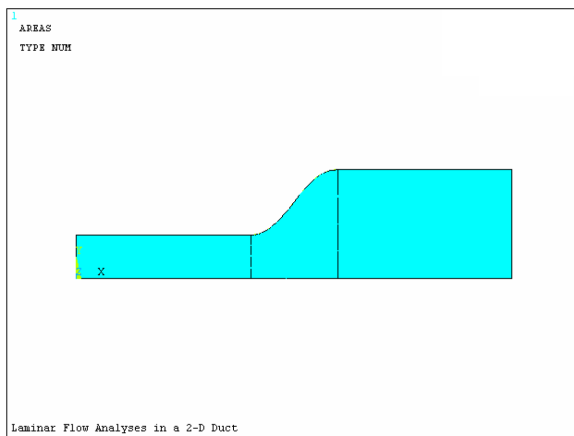



图 5-13 生成过渡面模型

04 划分网格。

❶定义单元网格密度：依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线和曲线，如图 5-14 所示。依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool，会弹出“MeshTool”对话框，如图 5-15 所示。

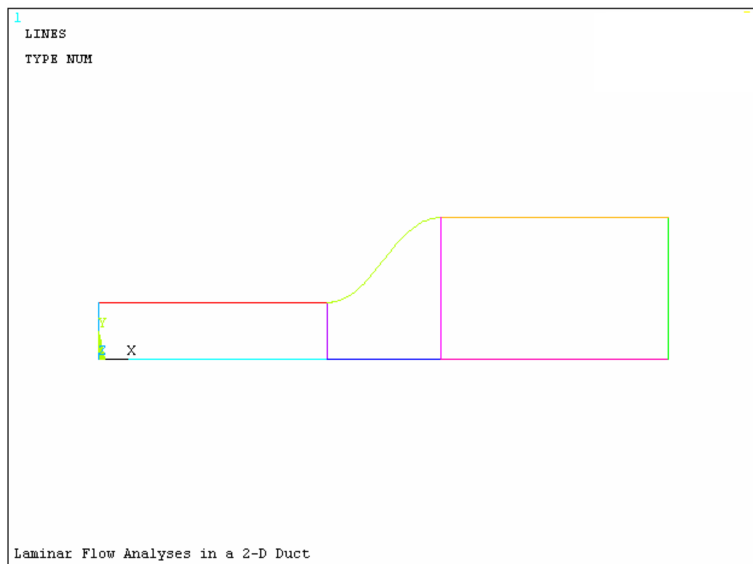



图 5-14 重新绘制直线和曲线

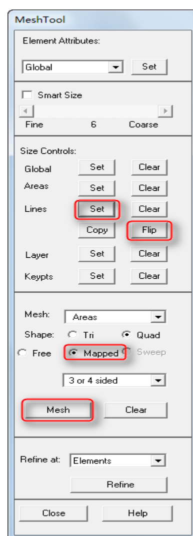



图 5-15 “MeshTool”对话框

❷在“MeshTool”对话框中单击 Lines→Set 按钮，会弹出拾取对话框，如图 5-16 所示。拾取入口矩形的上下边，单击“Apply”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 5-17 所示。

❸在“NDIV NO. of element divisions”中输入 15，在“SPACE Spacing ratio”中输入-2（这样设置使得直线两端的网格密度较大，中间网格密度较小），单击“Apply”按钮。

❹拾取过渡面积的上下两条曲线和直线，单击“Apply”按钮，弹出如图 5-17 所示的对话框。在“NDIV NO. of element divisions”中输入 12，在“SPACE Spacing ratio”中输入 1（这样设置使得直线被均匀划分），单击“Apply”按钮。

❺拾取出口矩形的上下两条直线，单击“Apply”按钮，弹出如图 5-17 所示的对话框。在“NDIV NO. of element divisions”中输入 15，在“SPACE Spacing ratio”中输入 3（这样设置使得直线左端的网格稀疏，而右边的网格较密集），单击“OK”按钮。

❻注意到出口矩形上边的网格尺寸划分密度没有偏向出口，这需要额外的操作处理。在“MeshTool”面板单击 Lines→Flip 按钮，弹出拾取对话框。拾取出口矩形上边，单击“OK”按钮。

❼定义横向网格密度。在 MeshTool 对话框中单击“Lines→Set”按钮，弹出拾取对话框。拾取图形窗口的 4 条垂直直线，单击“OK”按钮，弹出如图 5-17 所示对话框。在“NDIV NO. of element divisions”中输入 15，在“SPACE Spacing ratio”中输入-2（这

样设置使得直线左端的网格密度较大，中间网格密度较小），单击“OK”按钮。

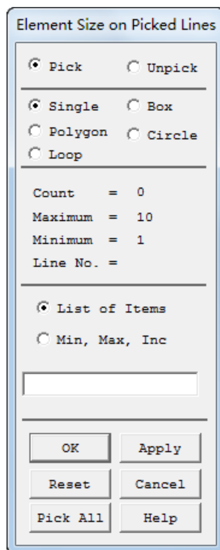



图 5-16 拾取对话框

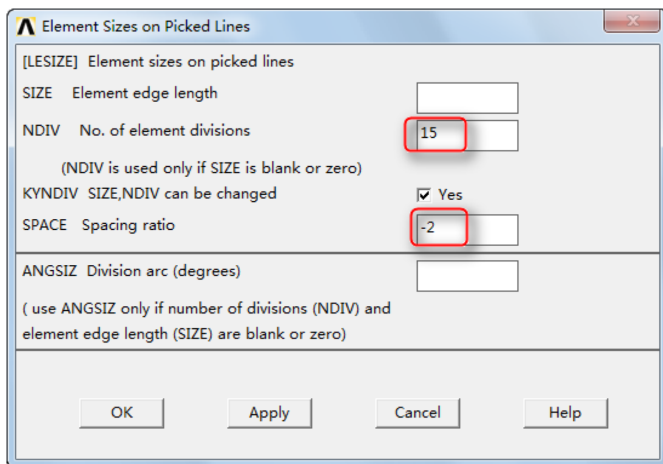



图 5-17 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

❽划分单元网格：在“MeshTool”对话框中单击“Mapped”按钮，以选择映射网络划分方式。单击“Mesh”按钮，会弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，进行映射网格划分，得到如图 5-18 所示的网格。

❾在工具条建立命令按钮：依次选择 Utility Menu→MenuCtrls→Edit Toolbar，弹出如图 5-19 所示的对话框。在“Selection”中*ABBR 后输入“tri,/triad,off”，单击“Accept”按钮，在工具条中生成“TRI”按钮。单击“Close”按钮关闭“Edit Toolbar”对话框。在“ANSYS”工具条单击“TRI”按钮，执行/trid,off 命令。

❿依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线和曲线。

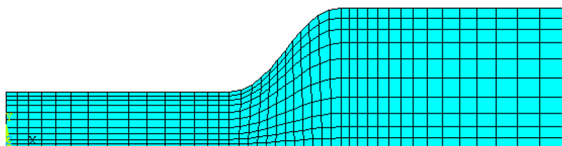


图 5-18 单元网格

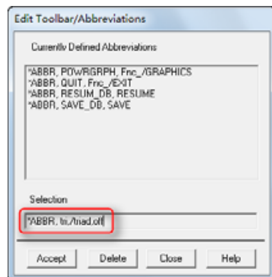



图 5-19 在工具条中建立命令按钮

**05** 定义边界条件。

❶定义来流速度：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Lines，会弹出拾取对话框。拾取入口矩形的左边，单击“OK”按钮，弹出“Apply VELO load on lines”对话框，如图 5-20 所示。在“VX Load value”中输入 1，“VY a load value”中输入 0。单击“OK”按钮关闭“Apply VELO load on lines”对话框。定义来流速度在 X 方向速度为 1in/s，Y 方向速度为 0。

❷定义管道上下边的粘附条件：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Lines，会弹出“拾取”对话框。拾取流场区域上下的 6 条直线或曲线，单击“OK”按钮，会弹出如图 5-20 所示的对话框。在“VX Load value”中输入 0，“VY a load value”中输入 0，单击“OK”按钮关闭“Apply VELO load on lines”对话框。

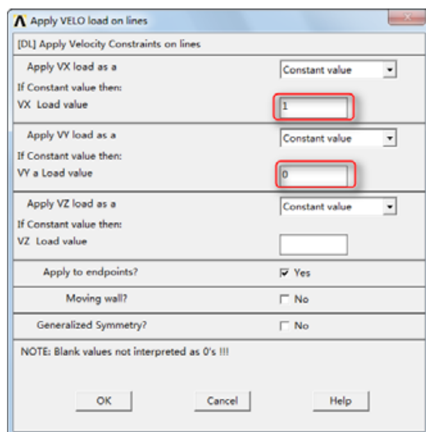



图 5-20 “Apply VELO load on lines”对话框

❸定义出口处的压力边界条件：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Lines，会弹出拾取对话框。拾取出口矩形的右边，单击“OK”按钮，弹出“Apply PRES on lines”对话框，如图 5-21 所示。在“Apply PRES on lines”对话框中“PRES Pressure value”后输入 0，单击“OK”按钮。

❹得到如图 5-22 所示的边界条件。单击“ANSYS”工具条的“SAVE_DB” 按钮保存数据。

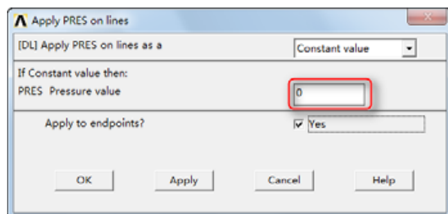



图 5-21 Apply PRES on lines 对话框

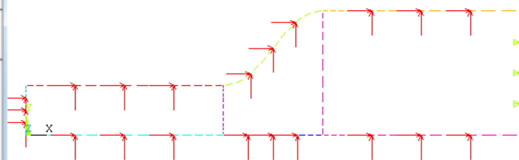


图 5-22 边界条件

## 5.6.2 求解

**01 定义流体的物理属性。**

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 5-23 所示。

❷在“Density”和“Viscosity”下拉列表中选择 Air-IN 选项，单击“OK”按钮。在“Fluid Properties”对话框中单击“OK”按钮，会弹出“CFD Flow Properties”对话框，

如图 5-24 所示。单击“OK”按钮接受默认设置，关闭“CFD Flow Properties”对话框。

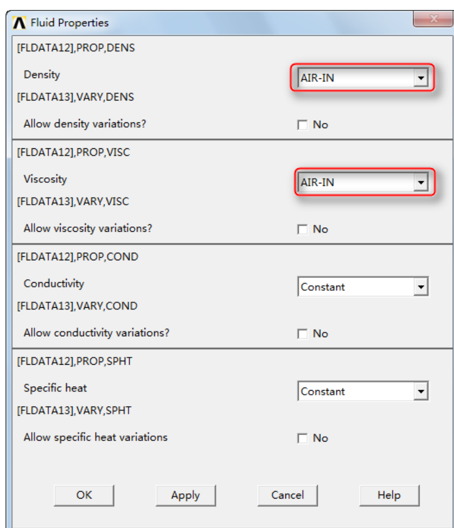



图 5-23 定义流体的物理属性

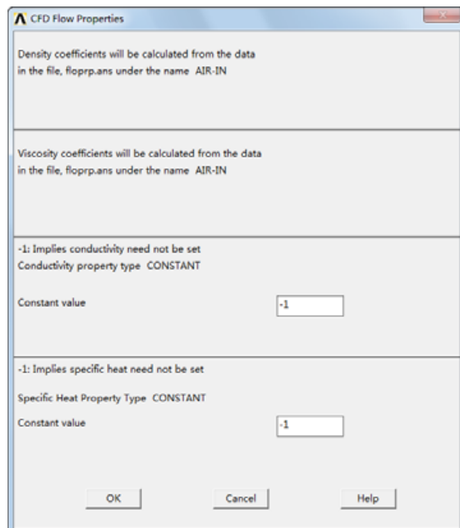



图 5-24 “CFD Flow Properties”对话框

**02** 设置求解控制选项。

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 5-25 所示。

❷在“Steady State Control Settings”对话框中“EXEC Global iterations”后输入 40，单击“OK”按钮关闭此对话框。

**03** 设置参考条件。

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Flow Environment→Ref Conditions，会弹出“Reference Conditions”对话框，如图 5-26 所示。

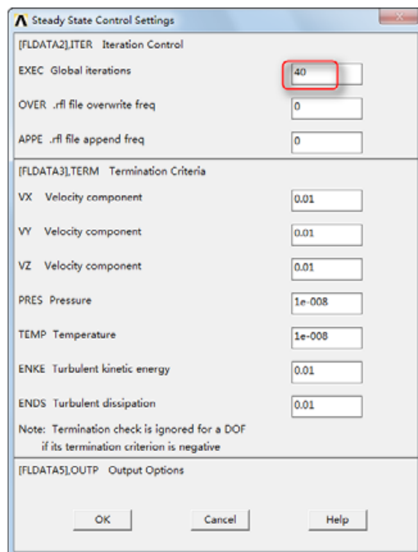



图 5-25 设置求解控制选项

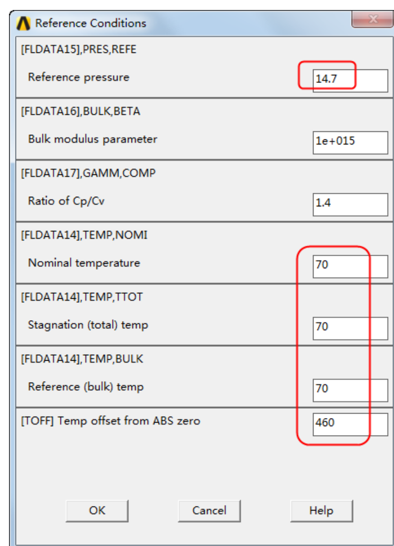



图 5-26 设置参考条件

❷在“Reference Conditions”对话框中，“Reference pressure”中输入 14.7，“Nominal temperature”中输入 70，“Stagnation（total） temp”中输入 70，“Reference（bulk） temp”中输入 70，“Temp offset from ABS zero”中输入 460。单击“OK”按钮确认并关闭“Reference Conditions”对话框。

❸单击依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”关闭。迭代曲线如图 5-27 所示。

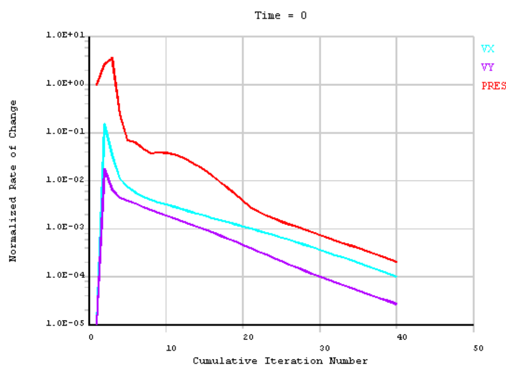



图 5-27 迭代曲线

## 5.6.3 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set 命令，读取最后一个迭代的计算结果。

❷绘制流场的速度分布图：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Vector Plot→Predefined，会弹出“Vector Plot of  Predefined Vectors”对话框，如图 5-28 所示。在对话框中选择“DOF Solution→Velocity V”，单击“OK”按钮，会得到流场的速度分布图，如图 5-29 所示。

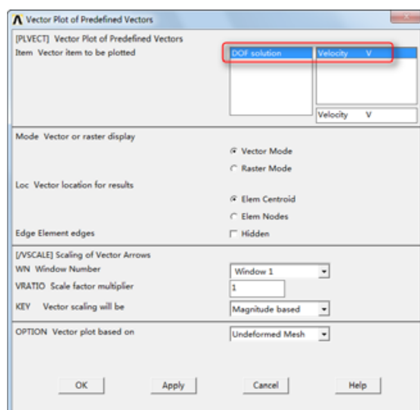



图 5-28 “Vector Plot of  Predefined Vectors”对话框

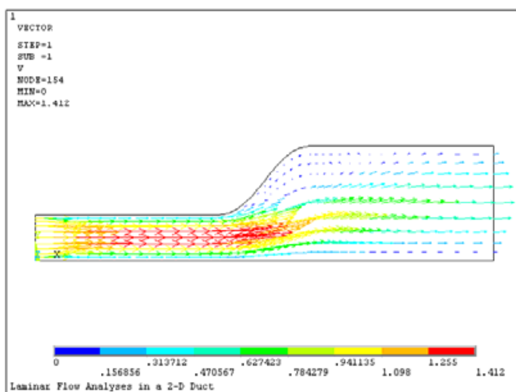



图 5-29 流场的速度分布图

❸绘制流场的总压力（静压和动压）分布图：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution 命令，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 5-30 所示。在对话框中选择 Other FLOTRAN Quantities→Total stagnation pressure，单击“OK”按钮，得到流场的总压力（静压和动压）分布图，如图 5-31 所示。

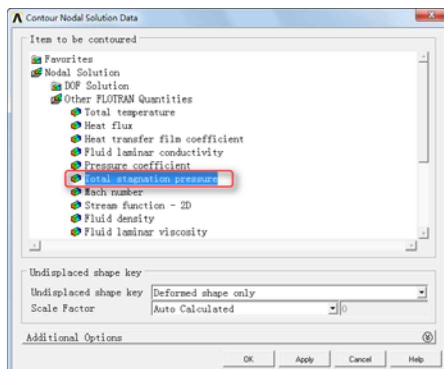



图 5-30 “Contour Nodal Solution Data”对话框

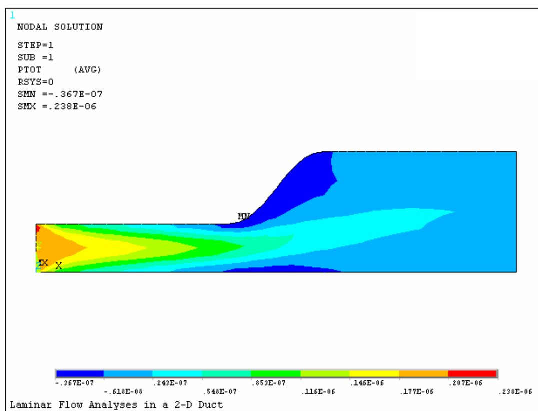



图 5-31 流场的总压力分布图

❹获得流体质点的运动轨迹动画：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Defi Trace Pt，会弹出“拾取”对话框。拾取如图 5-32 所示的几个点（大概位置就可以），单击“OK”按钮关闭对话框。

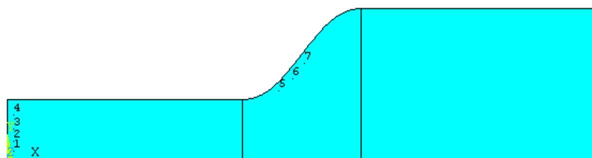


图 5-32 选取的点

❺依次选择 Utility Menu→PlotCrls→Animate→Particle Flow，会弹出“Animate Flow Trace”对话框，如图 5-33 所示。在对话框中选择“DOF solution→Velocity VX”，单击“OK”按钮，会得到流体质点的运动轨迹动画。

❻绘制出口处的流速分布：依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Define Path→By Nodal，会弹出“拾取”对话框。依次拾取出口处的下端节点和上端节点两个点，单击“OK”按钮，会弹出“By Nodes”对话框，如图 5-34 所示，在“Name Define Path Name”后输入路径名称“outlet”，单击“OK”按钮关闭对话框。

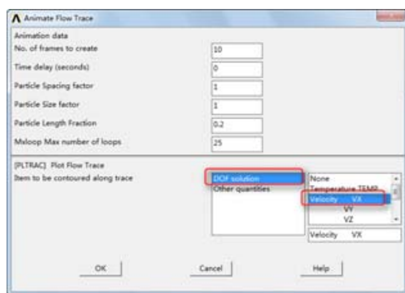


图 5-33 “Animate Flow Trace”对话框

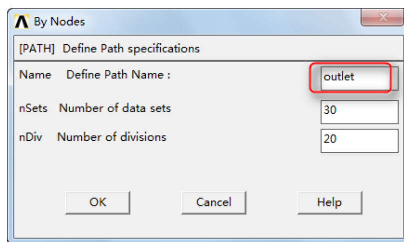



图 5-34 “By Nodes”对话框

❼依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Map onto Path，会弹出“Map Result Items onto Path”对话框，如图 5-35 所示。在“Lab User label for item”后输入“velocity”，在列表中选择“DOF Solution→Velocity VX”，单击“OK”按钮关闭对话框。

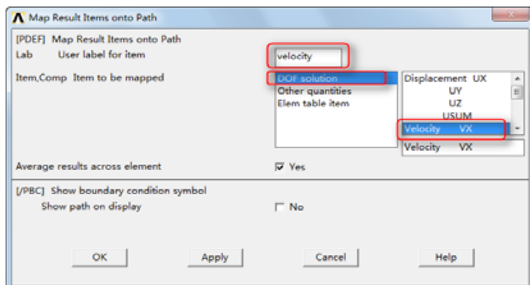



图 5-35 Map Result Items onto Path 对话框

❽依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Plot Path Items→On Graph，会弹出“Plot of Path Items On Graph”对话框，如图 5-36 所示。在列表中选择“velocity”选项，单击“OK”按钮确认，会得到沿路径“outlet”（出口）上流体速度的分布，如图 5-37 所示。

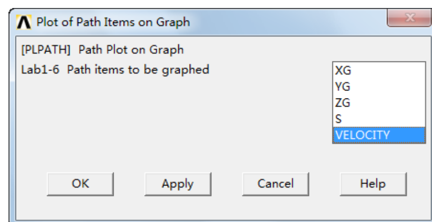



图 5-36 “Plot of Path Items On Graph”对话框

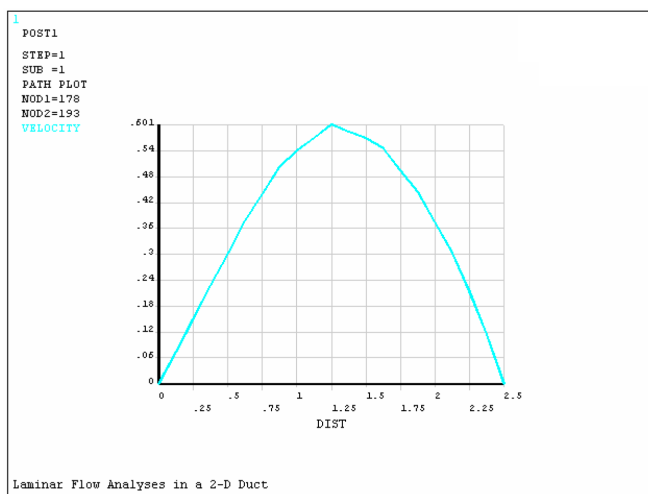



图 5-37 出口处的流速分布

## 5.6.4 命令流模式

```
/FILNAME,DUCT1,1
!定义工作名称
/TITLE,Laminar Flow Analyses in a 2-D Duct
!进入前处理器
/PREP7
!定义工作标题
ET,1,FLUID141
!指定单元类型
RECTNG,0,4,0,1,
RECTNG,6,10,0,2.5,
!建立过渡线模型
```

```
L2TAN,-3,-7
!建立过渡面模型
FLST,2,4,3
FITEM,2,3
FITEM,2,2
FITEM,2,5
FITEM,2,8
A,P51X
!划分网格
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,3
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,15,-2, , , ,1
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,9
FITEM,5,-10
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,12,1, , , ,1
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,5
FITEM,5,7
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,15,3, , , ,1
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,7
CM,_Y1,LINE
LSEL, , , ,P51X
*GET,_z1,LINE,,COUNT
*SET,_z2,0
*DO,_z5,1,_z1
*SET,_z2,LSNEXT(_z2)
*GET,_z3,LINE,_z2,ATTR,NDNX
*GET,_z4,LINE,_z2,ATTR,SPNX
```

```
*get,_z6,line,_z2,attr,kynd
*IF,_z3,GT,0,THEN
*IF,_z4,NE,0,THEN
LESIZE,_z2,,,_z3,1/_z4,,,,_z6
*ENDIF
*ENDIF
*ENDDO
CMSEL,S,_Y1
CMDELE,_Y1
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,2
FITEM,5,4
FITEM,5,6
FITEM,5,8
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,10,-2, , , ,1
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
FLST,5,3,5,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-3
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!定义来流速度
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,4
CM,_Y,LINE
LSEL,R, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
DL,_Y1, ,VX,1,1
DL,_Y1, ,VY,0,1
```

```
CMDELE,_Y1
!定义管道上下边的粘附条件
FLST,5,6,4,ORDE,6
FITEM,5,1
FITEM,5,3
FITEM,5,5
FITEM,5,7
FITEM,5,9
FITEM,5,-10
CM,_Y,LINE
LSEL,R, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
DL,_Y1, ,VX,0,1
DL,_Y1, ,VY,0,1
CMDELE,_Y1
!定义出口处的压力边界条件
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,6
CM,_Y,LINE
LSEL,R, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
/GO
DL,_Y1, ,PRES,0,1
CMDELE,_Y1
!定义流体的物理属性
/SOLU
FLDATA12,PROP,DENS,8
FLDATA12,PROP,VISC,8
FLDATA7,PROT,DENS,AIR-IN
FLDATA7,PROT,VISC,AIR-IN
!设置求解控制选项
FLDATA2,ITER,EXEC,40,
!设置参数条件
FLDATA15,PRES,REFE,14.7,
FLDATA14,TEMP,NOMI,70,
FLDATA14,TEMP,TTOT,70,
FLDATA14,TEMP,BULK,70,
TOFFSET,460,
!求解
```

```
SOLVE
FINISH
!后处理
/POST1
!读入计算结果
SET,LAST
!绘制流场的速度分布图
/VSCALE,1,1,0
PLVECT,V, , , ,VECT,ELEM,ON,0
!绘制流场的总压力（静压和动压）分布图
/EFACET,1
PLNSOL, PTOT,, 0
!获得流体质点的运动轨迹动画
FLST,2,8,8
FITEM,2,0.1,0.1,0
FITEM,2,0.1,0.3,0
FITEM,2,0.1,0.45,0
FITEM,2,0.1,0.6,0
FITEM,2,0.1,0.8,0
FITEM,2,4.75,1.35,0
FITEM,2,5,1.6,0
FITEM,2,5.25,1.85,0
TRPOIN,P51X,P51X
PLTRAC,FLUID,V,X, , ,25
ANFLOW,10,0, , ,2.12509371002,0.5E-01,0.2
!绘制出口处的流速分布
FLST,2,2,1
FITEM,2,178
FITEM,2,193
PATH,outlet,2,30,20,
PPATH,P51X,1
PATH,STAT
PDEF,velocity,V,X,AVG
/PBC,PATH, ,0
PLPATH,VELOCITY
```

## 5.7 2-D 管道流动分析（增加来流速的层流模型）

### 5.7.1 前处理

**01** 定义工作文件名和工作标题。

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会弹出“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“DUCT2”，并将“NEW log and error files”设置为“Yes”，如图 5-38 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

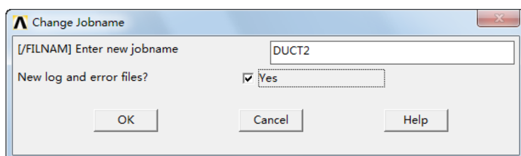



图 5-38 输入工作文件名对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会弹出“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Laminar Flow Analyses in a 2-D Duct”，如图 5-39 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

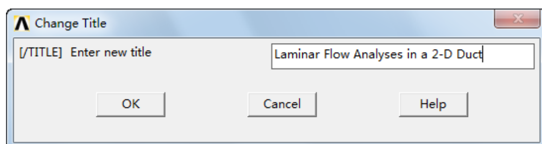



图 5-39 “Change Title”对话框

❸设置参数选择：依次选择 Main Menu→Preferences，会弹出“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 5-40 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

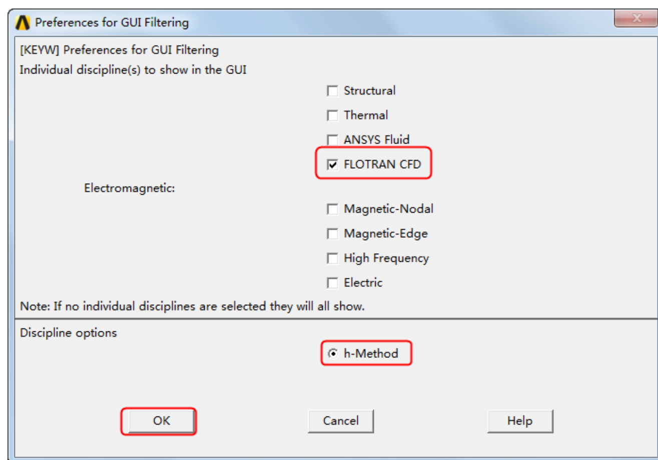



图 5-40 “Preferences for GUI Filtering”对话框

**02** 定义单元类型。

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit Delete，会弹出“Element Types”对话框，如图 5-41 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD 和 2D FLOTRAN

141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 5-42 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

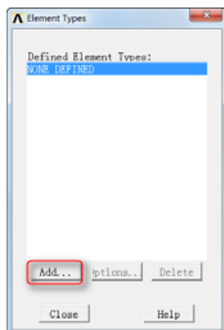



图 5-41 “Element Types”对话框

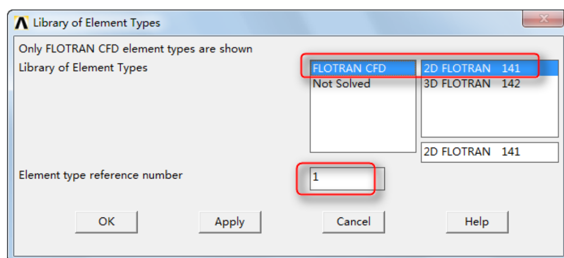



图 5-42 “Library of Element Types”对话框

❹单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

**03 建立几何模型。**

❶建立入口处矩形面模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 5-43 所示。

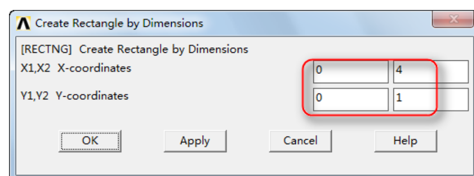



图 5-43 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

❷在“Create Rectangle by Dimensions”对话框中，依次输入 X1=0、X2=4 和 Y1=0、Y2=1。

❸单击“Apply”按钮，继续建立出口处矩形面模型。在“Create Rectangle by Dimensions”对话框中，依次输入 X1=6、X2=10 和 Y1=0、Y2=2.5。

❹单击“OK”按钮，关闭“Create Rectangle by Dimensions”对话框。单击“SAVE_DB”保存。

❺建立过渡面模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines，弹出“拾取”对话框，如图 5-44 所示。

❻拾取入口矩形（左边）的上边界，单击“OK”按钮。拾取入口矩形（左边）的上边界的右端点，单击“OK”按钮。

❼拾取出口矩形（右边）的上边界，单击“OK”按钮。拾取出口矩形（右边）的上边界的左端点，单击“OK”按钮，会生成一条光滑连接入口和出口的曲线，如图 5-45 所示。单击“OK”按钮，退出拾取对话框。

❽建立过渡面模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，会弹出拾取对话框，如图 5-46 所示。拾取入口矩形的右边两

个关键点和出口矩形的左边两个关键点，单击“OK”按钮，生成过渡面模型，如图 5-47 所示。

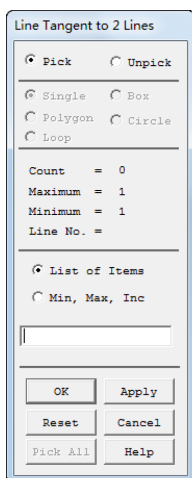



图 5-44 拾取对话框

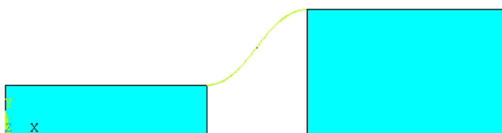



图 5-45 连接入口和出口的曲线

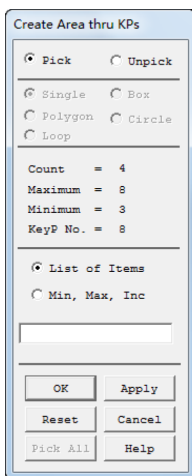



图 5-46 拾取对话框

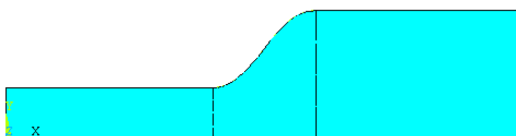



图 5-47 生成过渡面模型

**04** 划分网格。

❶定义单元网格密度：依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线和曲线，如图 5-48 所示。依次选择 Main Menu→Meshing→MeshTool，会弹出“MeshTool”对话框，如图 5-49 所示。

❷在“MeshTool”对话框中单击 Lines→Set 按钮，会弹出“拾取”对话框，如图 5-50 所示。拾取入口矩形的上下边，单击“Apply”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 5-51 所示。

❸在“NDIV NO. of element divisions”中输入 15，在“SPACE Space ratio”中输入 -2（这样设置使得直线两端的网格密度较大，中间网格密度较小），单击“Apply”按钮。




图 5-48 重新绘制直线和曲线

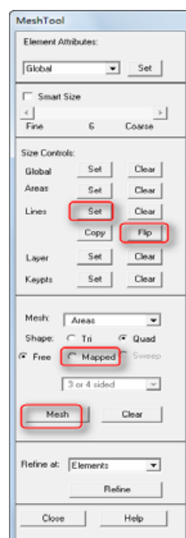


图 5-49 “MeshTool”对话框

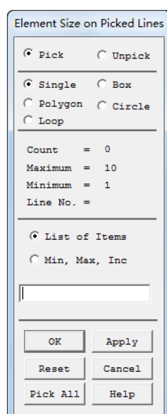



图 5-50 “拾取”对话框

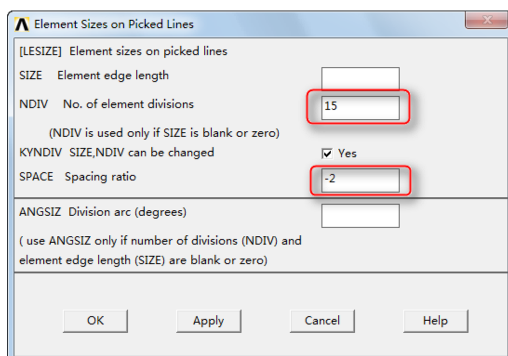



图 5-51 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

❹拾取过渡面积的上下两条曲线和直线，单击“Apply”按钮，弹出如图 5-51 所示对话框。在“NDIV NO. of element divisions”中输入 12，在“SPACE Spacing ratio”中输入 1（这样设置使得直线被均匀划分），单击“Apply”按钮确定。

❺拾取出口矩形的上下两条直线，单击“Apply”按钮，弹出如图 5-51 所示的对话框。在“NDIV NO. of element divisions”中输入 15，在“SPACE Spacing ratio”中输入 3（这样设置使得直线左端的网格稀疏，而右边的网格较密集），单击“OK”按钮。

❻注意到出口矩形上边的网格尺寸划分密度没有偏向出口，这需要额外的操作处理。在“MeshTool”对话框中单击 Lines→Flip 按钮，弹出拾取对话框。拾取出口矩形上边，单击“OK”按钮。

❼定义横向网格密度。在“MeshTool”对话框中单击 Lines→Set 按钮，弹出拾取对话框。拾取图形窗口的 4 条垂直直线，单击“OK”按钮，弹出如图 5-51 所示对话框。在“NDIV NO. of element divisions”中输入 10，在“SPACE Spacing ratio”中输入-2（这

样设置使得直线左端的网格密度较大，中间网格密度较小），单击“OK”按钮。

❽划分单元网格：在“MeshTool”对话框中单击“Mapped”按钮，以选择映射网络划分方式。单击“Mesh”按钮，会弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，进行映射网格划分，得到如图 5-52 所示的网格。

❾在工具条建立命令按钮：依次选择 Utility Menu→MenuCtrls→Edit Toolbar，弹出如图 5-53 所示对话框。在“Selection 中*ABBR”后输入“tri,/triad,off”，单击“Accept”按钮，在工具条生成 TRI 命令按钮。单击“Close”按钮关闭“Edit Toolbar”对话框。在“ANSYS”工具条单击 TRI 命令按钮，执行/trid,off 命令。

❿依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线和曲线。

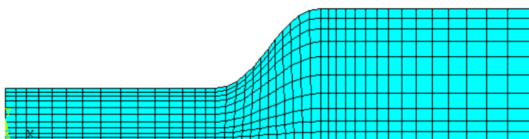


图 5-52 单元网格

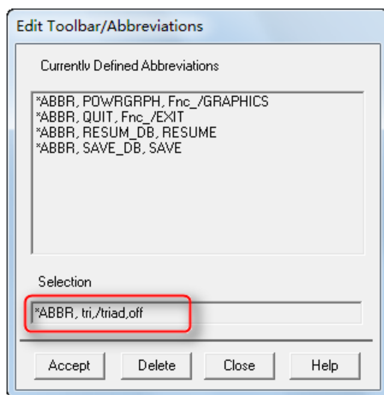



图 5-53 在工具条建立命令按钮

**05 定义边界条件。**

❶定义来流速度：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Lines 命令，会弹出“拾取”对话框。拾取入口矩形的左边，单击“OK”按钮，弹出“Apply VELO load on lines”对话框，如图 5-54 所示。在“VX　Load value”中输入 50，“VY　a load value”中输入 0，如图 5-54 所示。单击“OK”按钮关闭“Apply VELO load on lines”对话框。定义来流速度在 X 方向速度为 50in/s，Y 方向速度为 0。

❷定义管道上下边的粘附条件：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Lines，会弹出“拾取”对话框。拾取流场区域上下的 6 条直线或曲线，单击“OK”按钮，会弹出如图 5-54 所示的对话框。在“VX　Load value”中输入 0，“VY　a load value”中输入 0，单击“OK”按钮关闭“Apply VELO load on lines”对话框。

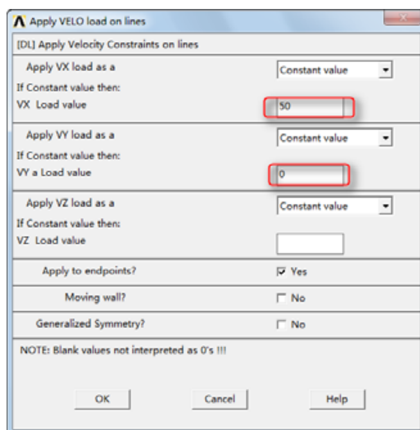



图 5-54 “Apply VELO load on lines”对话框

❸定义出口处的压力边界条件：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Lines，会弹出“拾取”对话框。拾取出口矩形的右边，单击“OK”按钮，弹出“Apply PRES on lines”对话框，如图 5-55 所示。在“Apply PRES on lines”对话框中“PRES Pressure value”后输入 0，单击“OK”按钮关闭“Apply PRES on lines”对话框。

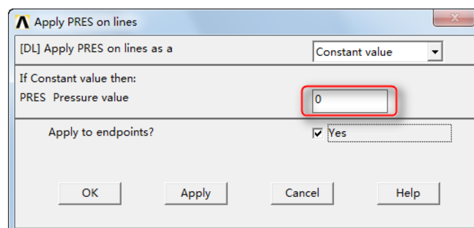



图 5-55 “Apply PRES on lines”对话框

❹得到如图 5-56 所示的边界条件。单击“ANSYS”工具条中的“SAVE_DB”按钮保存数据。

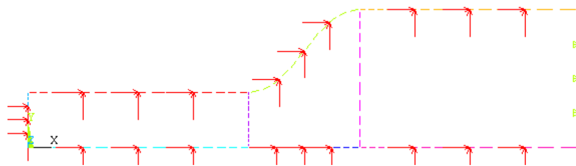


图 5-56 边界条件

## 5.7.2 求解过程

**01 定义流体的物理属性。**

❶单击依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹

出“Fluid Properties”对话框，如图 5-57 所示。

❷在“Density”和“Viscosity”下拉列表中选择“Air-IN”选项，单击“OK”按钮，会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 5-58 所示。单击“OK”按钮接受默认设置，关闭“CFD Flow Properties”对话框。

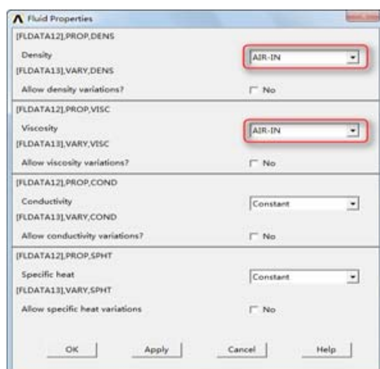


图 5-57 “Fluid Properties”对话框

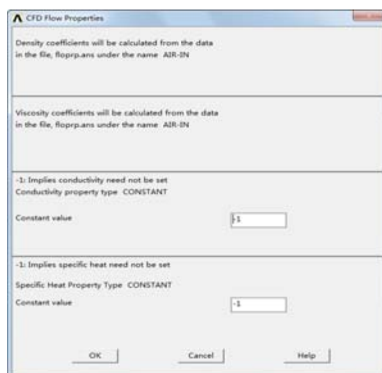


图 5-58 “CFD Flow Properties”对话框

**02 设置求解控制选项。**

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 5-59 所示。

❷在“Steady State Control Settings”对话框的“EXEC Global iterations”文本框中输入 40，如图 5-59 所示，单击“OK”按钮关闭此对话框。

**03 设置参数条件。**

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Flow Environment→Ref Conditions，会弹出“Reference Conditions”对话框，如图 5-60 所示。

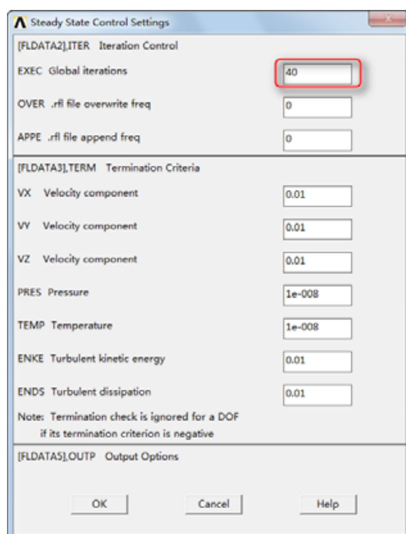


图 5-59 设置求解控制选项

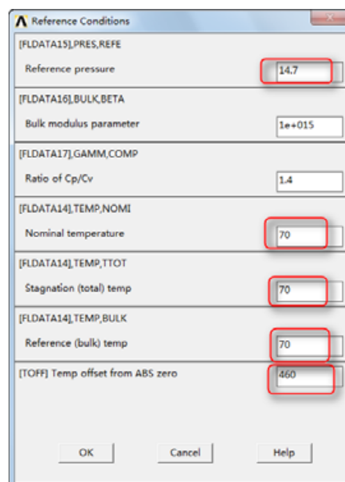


图 5-60 设置参数条件

❷在“Reference Conditions”对话框的“Reference pressure”中输入 14.7，“Nominal

temperature”中输入 70，“Stagnation（total） temp”中输入 70，“Reference（bulk） temp”中输入 70，“Temp offset from ABS zero”中输入 460。单击“OK”按钮确认并关闭“Reference Conditions”对话框。

❸依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN。这时会弹出一个错误提示框，如图 5-61 所示，单击“Proceed”按钮关闭提示框。求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”关闭。迭代曲线如图 5-62 所示。

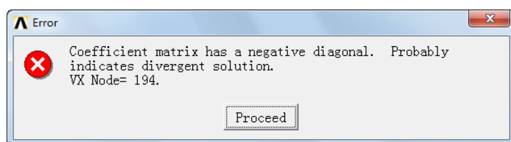



图 5-61 错误提示框

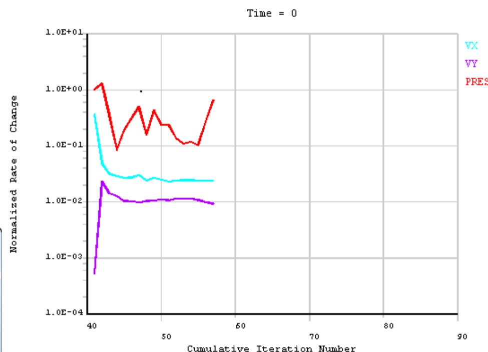



图 5-62 迭代曲线

❹依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Relax/Stab/Cab→MIR Stabilization，弹出如图 5-63 所示的对话框。

❺在“MOME Momentum Equation”中输入 0.1，单击“OK”按钮确认。

❻依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN 重新求解。在求解完成的提示框单击“Close”按钮关闭。重新计算的迭代曲线如图 5-64 所示。

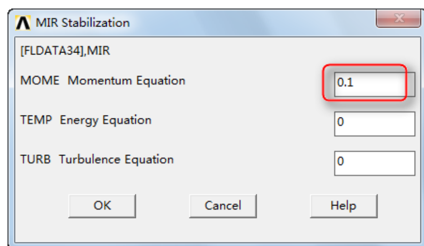



图 5-63 “MIR Stabilization”对话框

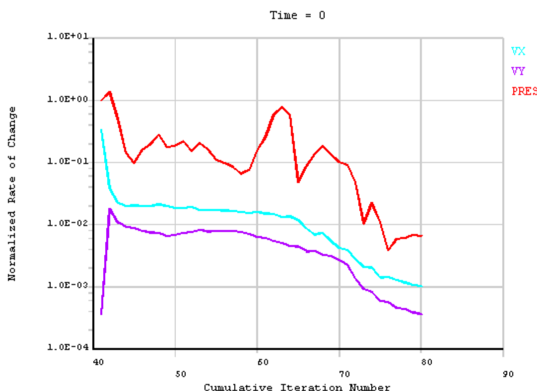



图 5-64 重新计算的迭代曲线

## 5.7.3 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

❷绘制流场的速度分布图：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Vector Plot> Predefined，会弹出“Vector Plot of　Predefined Vectors”对话框，如图 5-65 所示。在对话框中选择“DOF solution→Velocity V”，单击“OK”按钮，会得到流场的速度分布图，如图 5-66 所示。

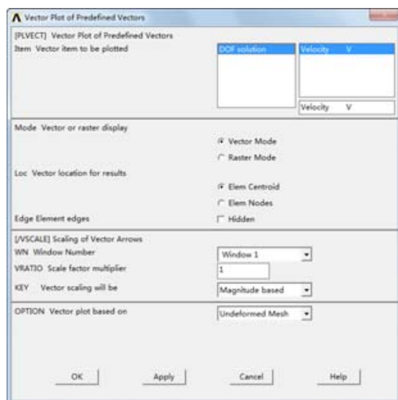



图 5-65　“Vector Plot of　Predefined Vectors”对话框

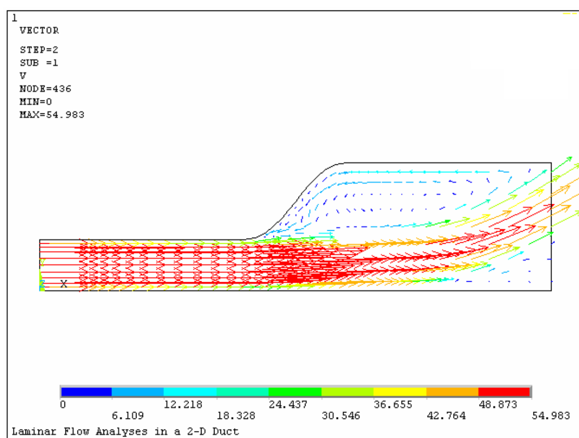



图 5-66　流场的速度分布图

❸绘制流场的总压力（静压和动压）分布图：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 5-67 所示。在对话框中选择“Other FLOTRAN Quantities→Total stagnation pressure”，单击“OK”按钮，会得到流场的总压力（静压和动压）分布图，如图 5-68 所示。

❹获得流体质点的运动轨迹动画：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Defi Trace Pt，会弹出拾取对话框。拾取如图 5-69 所示的几个点（大概位置就可以），单击“OK”按钮关闭对话框。

❺依次选择 Utility Menu→PlotCrls→Animate→Particle Flow，会弹出“Animate Flow

Trace”对话框，如图 5-70 所示。在对话框中选择“DOF Solution→Velocity VX”，单击“OK”按钮，会得到流体质点的运动轨迹动画。

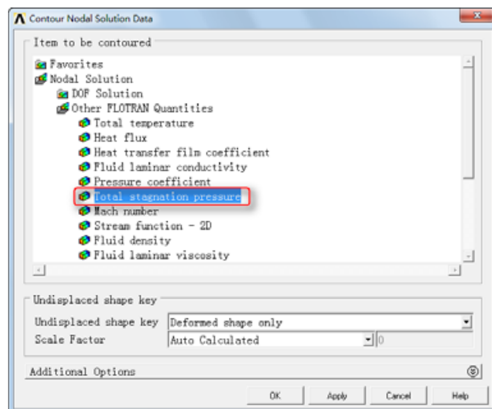



图 5-67 “Contour Nodal Solution Data”对话框

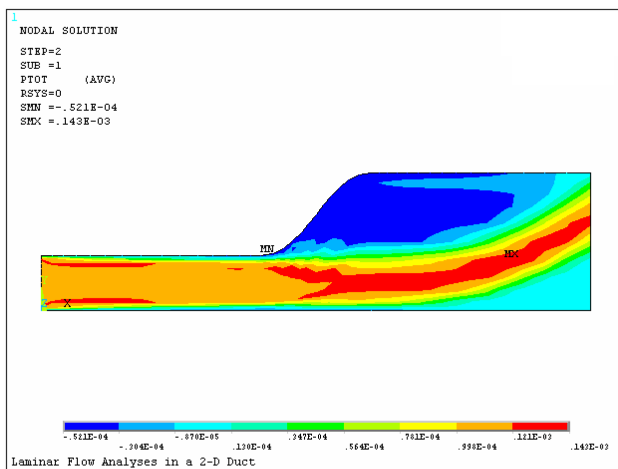



图 5-68 流场的总压力分布图

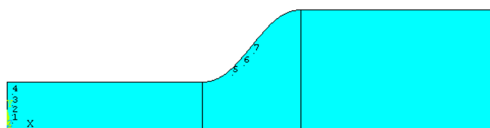


图 5-69 选取的点

❻绘制出口处的流速分布：依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Define Path→By Nodas，会弹出“拾取”对话框。依次拾取出口处的下端节点和上端节点两个点，单击“OK”按钮，会弹出“By Nodes”对话框，如图 5-71 所示，在“Name Define Path Name”后输入路径名称“outlet”，单击“OK”按钮关闭对话框。

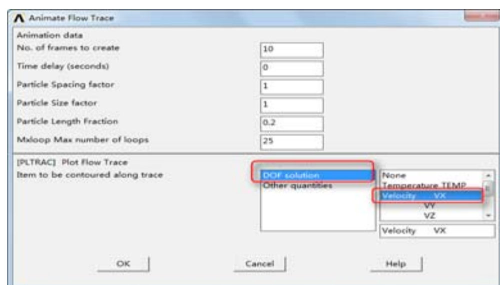



图 5-70 “Animate Flow Trace”对话框

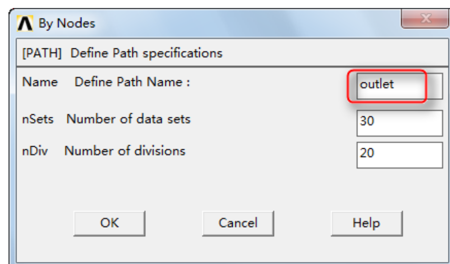



图 5-71 “By Nodes”对话框

❼依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Map onto Path，会弹出“Map Result Items onto Path”对话框，如图 5-72 所示。在“Lab User label for item”后输入“velocity”，在列表中选择“DOF Solution→Velocity VX”，单击“OK”按钮关闭对话框。

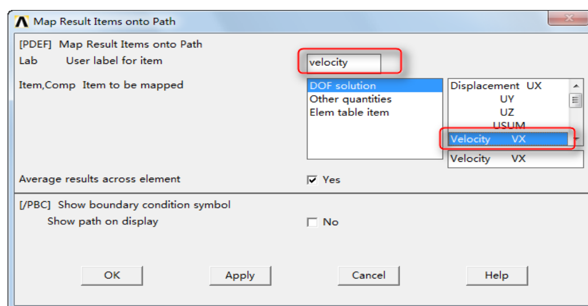



图 5-72 “Map Result Items onto Path”对话框

❽依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Plot Path Items→On Graph，会弹出“Plot of Path Items On Graph”对话框，如图 5-73 所示。在列表中选择“velocity”选项，单击“OK”按钮确认，会得到沿路径“outlet”（出口）上流体速度的分布，如图 5-74 所示。

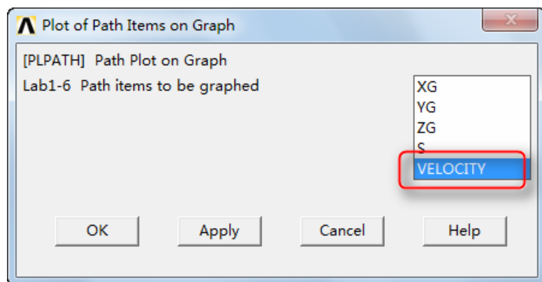



图 5-73 “Plot of Path Items On Graph”对话框

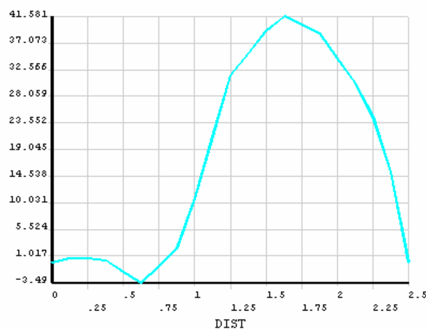



图 5-74 出口处流速的分布

### 5.7.4 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

## 5.8 2-D 管道流动分析（增加出口段长度的层流模型）

### 5.8.1 前处理

**01 定义工作文件名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名 DUCT3，并将“NEW log and error files”设置为“Yes”，如图 5-75 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

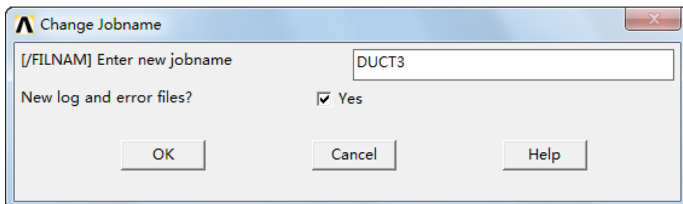



图 5-75 输入工作名对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Laminar Flow Analyses in a 2-D Duct”，如图 5-76 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 5-77 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

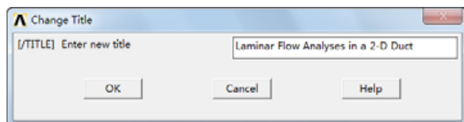



图 5-76 “Change Title”对话框

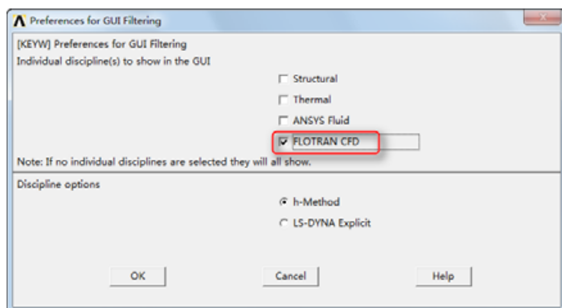



图 5-77 “Preferences for GUI Filtering”对话框

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→

Add/EditDelete，会弹出“Element Type”s 对话框，如图 5-78 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在 Library of Element Types 列表框中选择“FLOTRAN CFD 和 2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 5-79 所示。单击“OK”按钮关闭 Library of Element Types 对话框。

❹单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

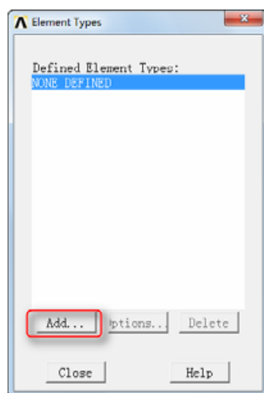



图 5-78 “Element Types”对话框

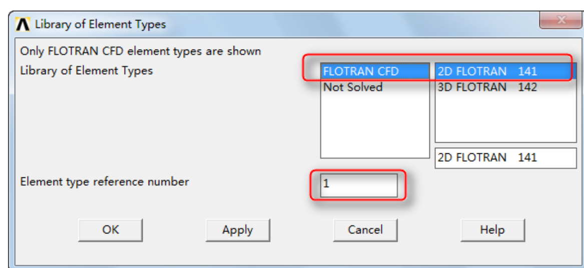



图 5-79 Library of Element Types 对话框

## 03 建立几何模型。

❶建立入口处矩形面模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 5-80 所示。

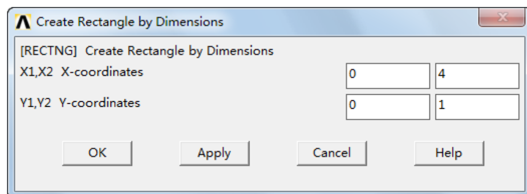



图 5-80 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

❷在“Create Rectangle by Dimensions”对话框中，依次输入 X1=0、X2=4 和 Y1=0、Y2=1，如图 5-80 所示。

❸单击“Apply”按钮，继续建立出口处矩形面模型。在“Create Rectangle By Dimensions”对话框中，依次输入 X1=6、X2=40 和 Y1=0、Y2=2.5。

❹单击“OK”按钮，关闭“Create Rectangle by Dimensions”对话框。单击“SAVE_DB”保存。

❺建立过渡面模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines，弹出“拾取”对话框，如图 5-81 所示。

❻拾取入口矩形（左边）的上边界，单击“OK”按钮。拾取入口矩形（左边）的上边界的右端点，单击“OK”按钮。

❼拾取出口矩形（右边）的上边界，单击“OK”按钮。拾取出口矩形（右边）的上边界的左端点，单击“OK”按钮。会生成一条光滑连接入口和出口的曲线，如图 5-82 所示。单击“OK”按钮，退出拾取对话框。

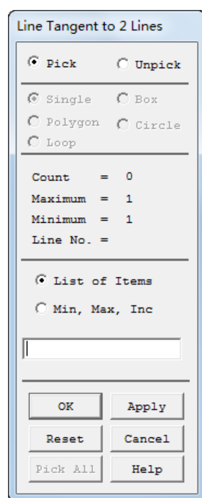



图 5-81 “拾取”对话框

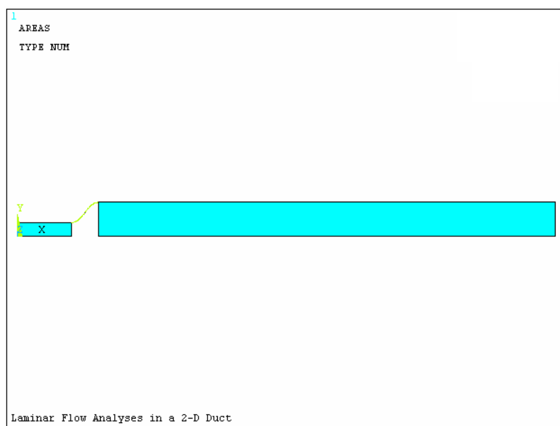



图 5-82 连接入口和出口的曲线

❽建立过渡面模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，会弹出拾取对话框，如图 5-83 所示。拾取入口矩形的右边两个关键点和出口矩形的左边两个关键点，单击“OK”按钮，生成过渡面模型，如图 5-84 所示。

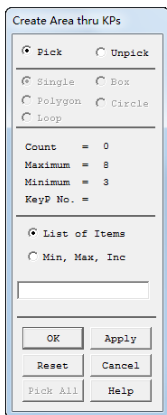



图 5-83 拾取对话框

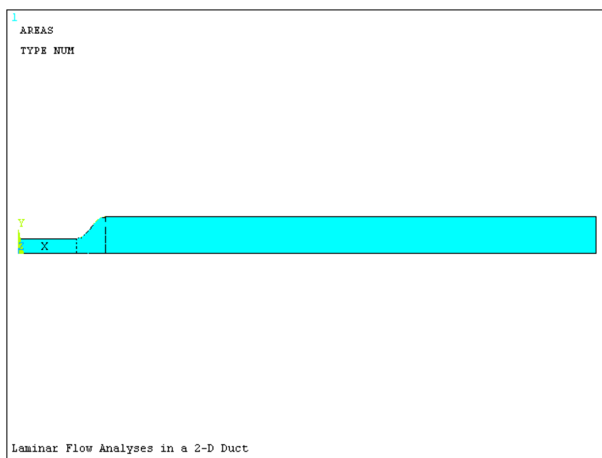
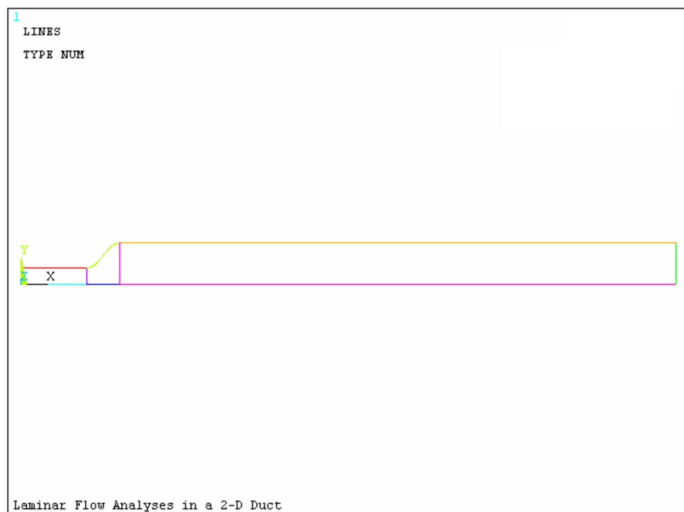



图 5-84 生成过渡面模型

**04** 划分网格。

❶定义单元网格密度：依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线和曲线，如图 5-85 所示。依次选择 Main Menu→Meshing→MeshTool，会弹出“MeshTool”对话框，如图 5-86 所示。



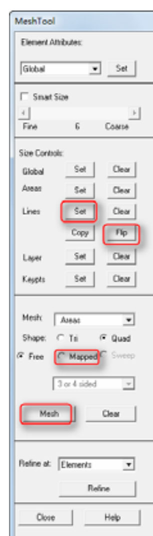
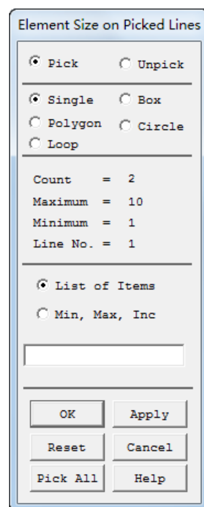




图 5-85 重新绘制直线和曲线　　　　图 5-86 “MeshTool”对话框

❷在“MeshTool”对话框中单击 Lines→Set 按钮，会弹出拾取对话框，如图 5-87 所示。拾取入口矩形的上下边，单击“Apply”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 5-88 所示。



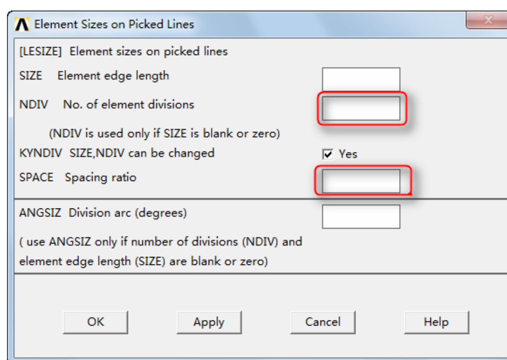




图 5-87 “拾取”对话框　　　　图 5-88 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

❸在“NDIV NO. of element divisions”中输入 15，在“SPACE Spacing ratio”中输入-2（这样设置使得直线两端的网格密度较大，中间网格密度较小），单击“Apply”按钮。

❹拾取过渡面积的上下两条曲线和直线，单击“Apply”按钮，弹出如图 5-88 所示对话框。在“NDIV NO. of element divisions”中输入 12，在“SPACE Spacing ratio”中输入 1（这样设置使得直线被均匀划分），单击“Apply”按钮确定。

❺拾取出口矩形的上下两条直线，单击“Apply”按钮，弹出如图 5-88 所示的对话

框。在“NDIV NO. of element divisions”中输入 45，在“SPACE Spacing ratio”中输入 3（这样设置使得直线左端的网格稀疏，而右边的网格较密集），单击“OK”按钮。

❻注意到出口矩形上边的网格尺寸划分密度没有偏向出口，这需要额外的操作处理。在“MeshToo”l 面板单击“Lines→Flip”按钮，弹出拾取对话框。拾取出口矩形上边，单击“OK”按钮。

❼定义横向网格密度。在“MeshTool”对话框中单击“Lines→Set”按钮，弹出拾取对话框。拾取图形窗口的四条垂直直线，单击“OK”按钮，弹出如图 5-88 所示对话框。在“NDIV NO. of element divisions”中输入 10，在“SPACE Spacing ratio”中输入-2（这样设置使得直线左端的网格密度较大，中间网格密度较小），单击“OK”按钮。

❽划分单元网格：在“MeshTool”对话框中单击“Mapped”按钮，以选择映射网络划分方式。单击“Mesh”按钮，会弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，进行映射网格划分，得到如图 5-89 所示的网格。



图 5-89 单元网格

❾在工具条中建立命令按钮：依次选择 Utility Menu→MenuCtrls→Edit Toolbar，弹出如图 5-90 所示的对话框。在“Selection”中“*ABBR”后输入“tri,/triad,off”，单击“Accept”按钮，在工具条生成“TRI”按钮。单击“Close”按钮关闭 Edit Toolbar 对话框。在 ANSYS 工具条单击“TRI”按钮，执行“/trid,off”命令。

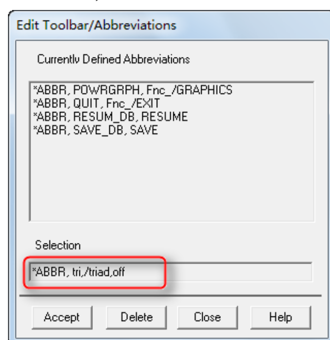



图 5-90 在工具条建立命令按钮

❿依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线和曲线。

**05 定义边界条件。**

❶定义来流速度：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Lines，会弹出“拾取”对话框。拾取入口矩形的左边，单击“OK”按钮，弹出“Apply VELO load on lines”对话框，如图 5-91 所示。在“VX Load value”中输入 50，“VY a load value”中输入 0，如图 5-91 所示。单击“OK”按钮关闭“Apply VELO load on lines”对话框。定义来流速度在 X 方向速度为 50in/s，Y 方向速度为 0。

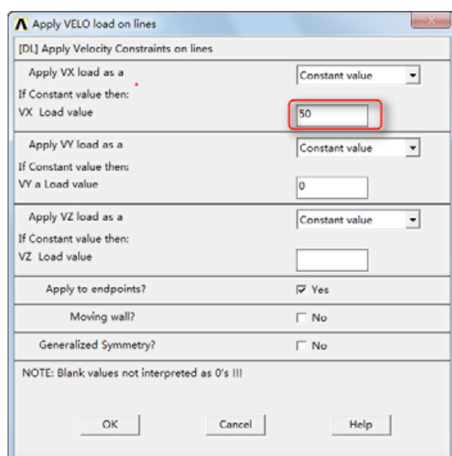



图 5-91 “Apply VELO load on lines”对话框

❷定义管道上下边的粘附条件：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Lines，会弹出“拾取”对话框。拾取流场区域上下的 6 条直线或曲线，单击“OK”按钮，会弹出如图 5-91 所示的对话框。在“VX Load value”中输入 0，“VY a load value”中输入 0，单击“OK”按钮关闭“Apply VELO load on lines”对话框。定义管道上下边的粘附条件。

❸定义出口处的压力边界条件：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Lines，会弹出“拾取”对话框。拾取出口矩形的右边，单击“OK”按钮，弹出“Apply PRES on lines”对话框，如图 5-92 所示。在“Apply PRES on lines”对话框中 PRES Pressure value 后输入 0，单击“OK”按钮关闭 Apply PRES on lines 对话框。

❹得到如图 5-93 所示的边界条件。单击“ANSYS”工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

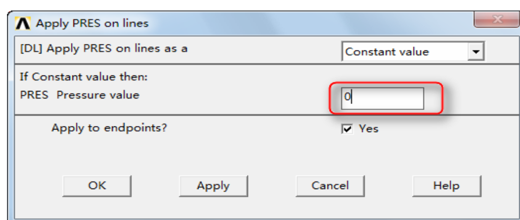



图 5-92 “Apply PRES on lines”对话框

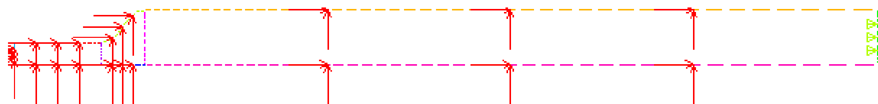


图 5-93 边界条件

## 5.8.2 求解过程

**01 定义流体的物理属性。**

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 5-94 所示。

❷在“Density”和“Viscosity”下拉列表中选择“Air-IN”选项，单击“OK”按钮。在“Fluid Properties”对话框中单击“OK”按钮，会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 5-95 所示。单击“OK”按钮接受默认设置，关闭“CFD Flow Properties”对话框。

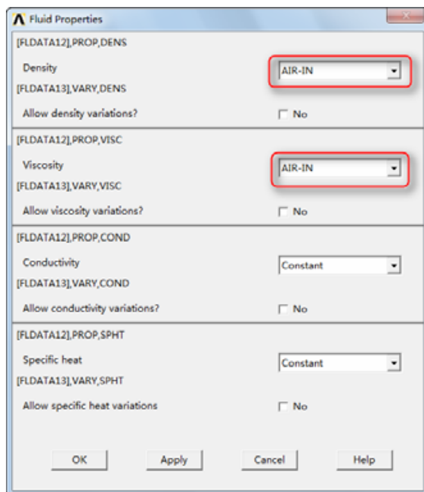


图 5-94 定义流体的物理属性

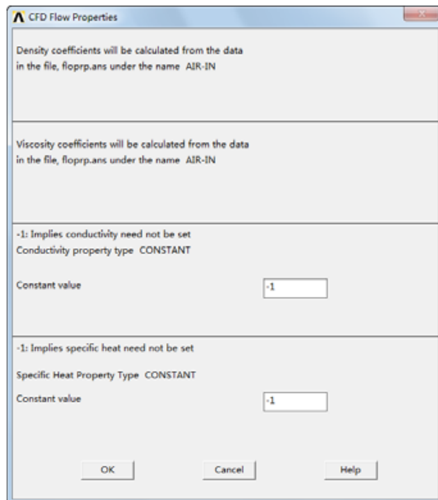


图 5-95 “CFD Flow Properties”对话框

**02 设置求解控制选项。**

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 5-96 所示。

❷在“Steady State Control Settings”对话框中“EXEC Global iterations”后输入 40，如图 5-97 所示，单击“OK”按钮关闭此对话框。

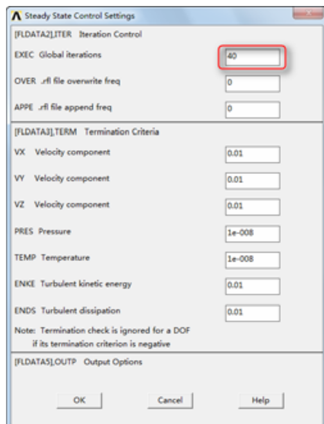


图 5-96 设置求解控制选项

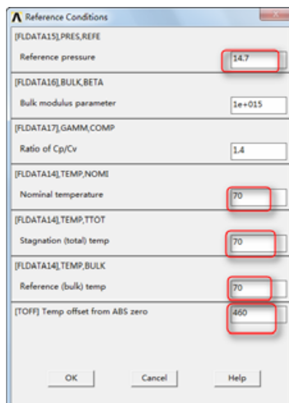


图 5-97 设置参数条件

**03** **设置参数条件。**

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Flow Environment→Ref Conditions，会弹出“Reference Conditions”对话框，如图 5-97 所示。

❷在“Reference Conditions”对话框中，“Reference pressure”中输入 14.7，“Nominal temperature”中输入 70，“Stagnation（total） temp”中输入 70，“Reference（bulk） temp”中输入 70，“Temp offset from ABS zero”中输入 460。单击“OK”按钮确认并关闭“Reference Conditions”对话框。

❸依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”关闭。迭代曲线如图 5-98 所示。

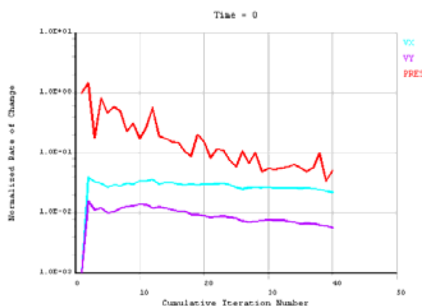



图 5-98 迭代曲线

## 5.8.3 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

❷绘制流场的速度分布图：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Vector Plot→Predefined，会弹出“Vector Plot of Predefined Vectors”对话框，如图 5-99 所示。在对话框中选择“DOF Solution→Velocity V”，单击“OK”按钮，会得到流场的速度分布图，如图 5-100 所示。

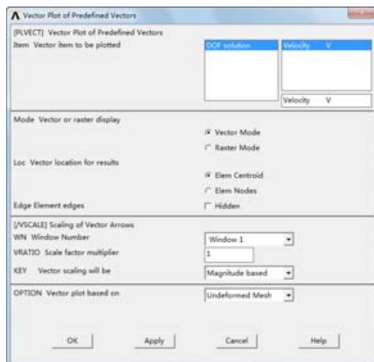



图 5-99 “Vector Plot of Predefined Vectors”对话框

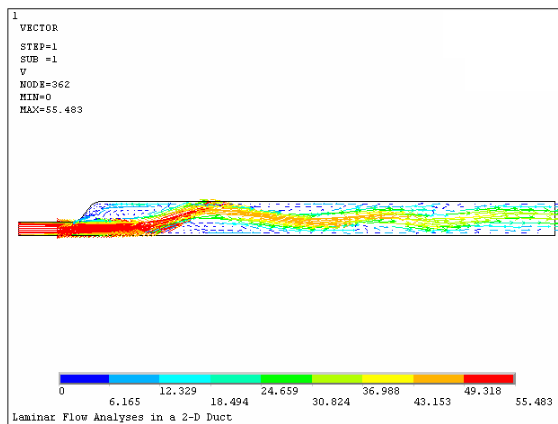



图 5-100 流场的速度分布图

❸绘制流场的总压力（静压和动压）分布图：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 5-101 所示。在对话框中选择“Other FLOTRAN Quantities→Total stagnation pressure”，单击“OK”按钮，会得到流场的总压力（静压和动压）分布图，如图 5-102 所示。

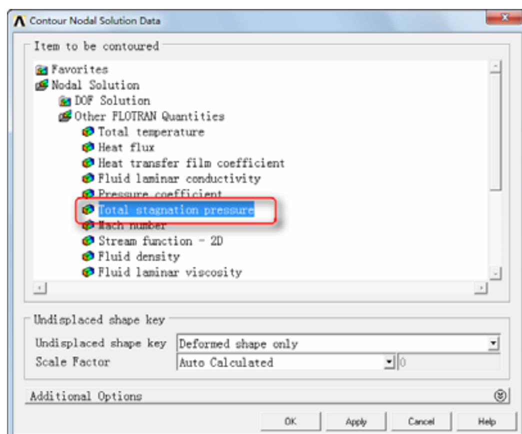



图 5-101 “Contour Nodal Solution Data”对话框

❹获得流体质点的运动轨迹动画：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Defi Trace Pt，会弹出“拾取”对话框。拾取如图 5-103 所示的几个点（大概位置就可以），单击“OK”按钮关闭对话框。

❺依次选择 Utility Menu→PlotCrls→Animate→Particle Flow，会弹出“Animate Flow Trace”对话框，如图 5-104 所示。在对话框中选择“DOF solution→Velocity VX”，单击“OK”按钮，会得到流体质点的运动轨迹动画。

❻绘制出口处的流速分布：依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Define Path→By Nodal 命令，会弹出“拾取”对话框。依次拾取出口处的下端节点和

上端节点两个点，单击“OK”按钮，会弹出“By Nodes”对话框，如图 5-105 所示，在“Name Define Path Name”后输入路径名称“outlet”，单击“OK”按钮关闭对话框。

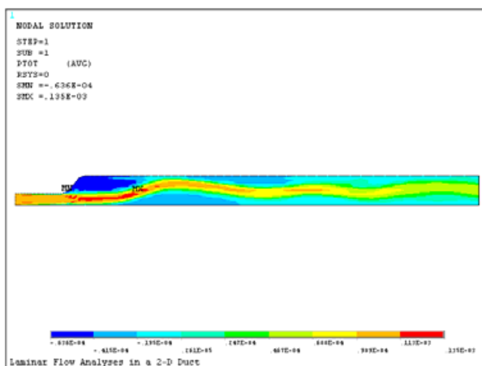
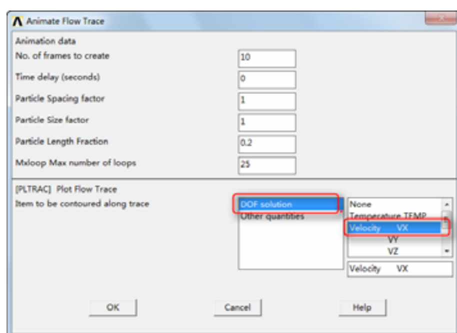



图 5-102 流场的总压力分布图



图 5-103 选取的点



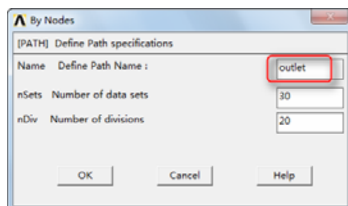




图 5-104 “Animate Flow Trace”对话框　　图 5-105 “By Nodes”对话框

❼依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Map onto Path，会弹出“Map Result Items onto Path”对话框，如图 5-106 所示。在“Lab User label for item”后输入“velocity”，在列表中选择“DOF Solution→Velocity VX”，单击“OK”按钮关闭对话框。

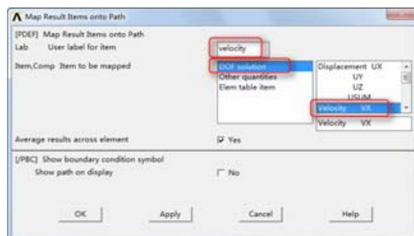



图 5-106 “Map Result Items onto Path”对话框

❽依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Plot Path Items→On Graph，会弹出“Plot of Path Items On Graph”对话框，如图 5-107 所示。在列表中选择“velocity”选项，单击“OK”按钮确认，会得到出口处流速的分布，如图 5-108 所示。

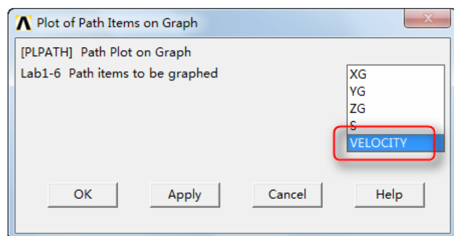



图 5-107 “Plot of Path Items On Graph”对话框

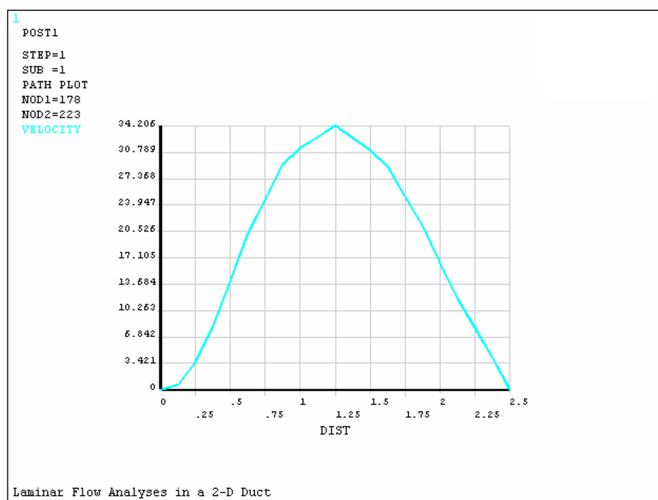



图 5-108 出口处流速的分布

❾计算雷诺数：需要计算雷诺数以确定流动是处于层流状态还是湍流状态。如果 *Re* →3000，则分析流动就必须采用湍流模型。计算雷诺数的公式如下

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}$$

这里的流体是空气，相关数据如下：$\rho$(空气密度)=1.21e-7；$v$ (来流速度)=50；$l$ (水压直径)=2*入口直径=2；$\mu$(空气粘度)=2.642e-9。

将以上数据代入上述公式中，得到 *Re*=4600。这说明高度来流将产生湍流，所以以上的层流分析不能精确描述实际流动。因此，要想精确求解这个问题应采用湍流模型，下一节中将详细求解这个问题。

## 5.8.4 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

# 5.9 2-D 管道湍流流动分析（增加出口段长度的湍流模型）

## 5.9.1 前处理

**01 定义工作文件名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“DUCT4”，并将“NEW log and error files”设置为“Yes”，如图 5-109 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

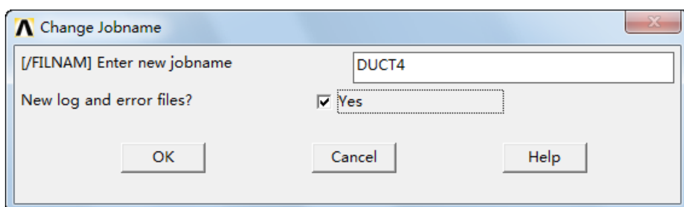



图 5-109 “Change Jobname”对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Turbulent Flow Analyses in a 2-D Duct”，如图 5-110 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸设置参数选择：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 5-111 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

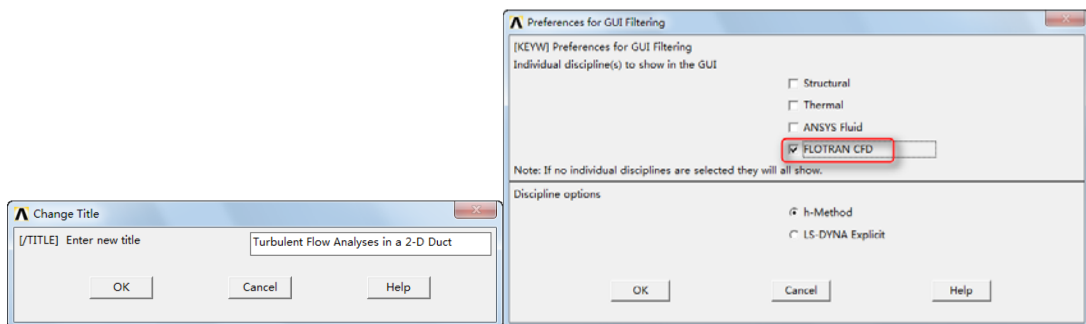



图 5-110 “Change Title”对话框　　图 5-111 “Preferences for GUI Filtering”对话框

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit Delete，会弹出“Element Types”对话框，如图 5-112 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 5-113 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

❹单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

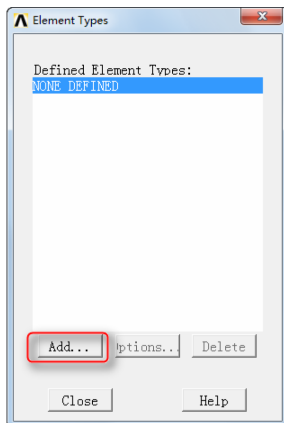



图 5-112 “Element Types”对话框

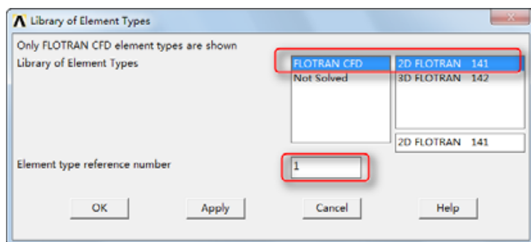



图 5-113 “Library of Element Types”对话框

**03** 建立几何模型。

❶建立入口处矩形面模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 5-114 所示。

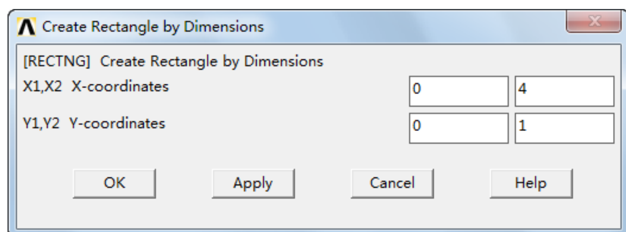



图 5-114 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

❷在“Create Rectangle by Dimensions”对话框中，依次输入 X1=0、X2=4 和 Y1=0、Y2=1，如图 5-114 所示。

❸单击“Apply”按钮，继续建立出口处矩形面模型。在“Create Rectangle by Dimensions”对话框中，依次输入 X1=6、X2=40 和 Y1=0、Y2=2.5。

❹单击“OK”按钮，关闭“Create Rectangle by Dimensions”对话框。单击“SAVE_DB”保存。

❺建立过渡面模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines，弹出“拾取”对话框，如图 5-115 所示。

❻拾取入口矩形（左边）的上边界，单击“OK”按钮。拾取入口矩形（左边）的上边界的右端点，单击“OK”按钮。

❼拾取出口矩形（右边）的上边界，单击“OK”按钮。拾取出口矩形（右边）的上边界的左端点，单击“OK”按钮。会生成一条光滑连接入口和出口的曲线，如图 5-116 所示。单击“OK”按钮，退出拾取对话框。

❽建立过渡面模型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas

→Arbitrary→Through KPs，会弹出拾取对话框，如图 5-117 所示。拾取入口矩形的右边两个关键点和出口矩形的左边两个关键点，单击“OK”按钮，生成过渡面模型，如图 5-118 所示。

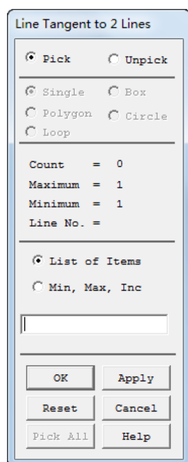



图 5-115 拾取对话框

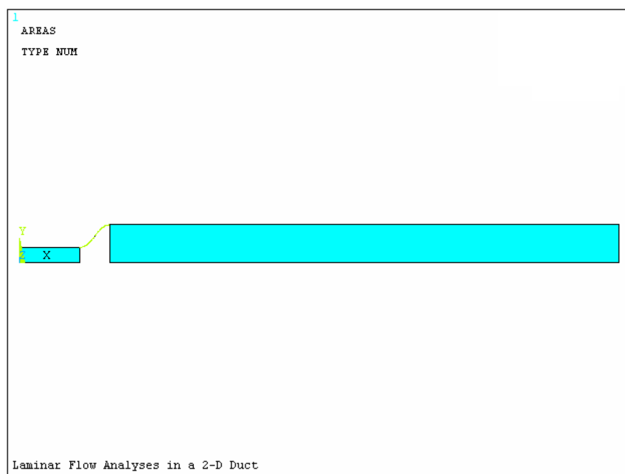



图 5-116 连接入口和出口的曲线

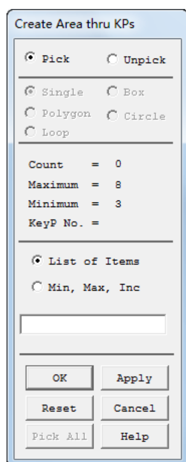



图 5-117 “拾取”对话框

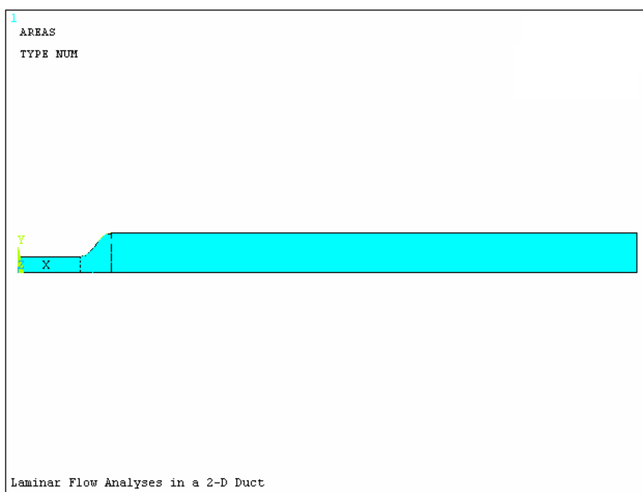



图 5-118 生成过渡面模型

**04** 划分网格。

❶定义单元网格密度：依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线和曲线，如图 5-119 所示。依次选择 Main Menu→Meshing→MeshTool，会弹出“MeshTool”对话框，如图 5-120 所示。

❷在“MeshTool”对话框中单击 Lines→Set 按钮，会弹出拾取对话框，如图 5-121 所示。拾取入口矩形的上下边，单击“Apply”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 5-122 所示。

❸在“NDIV NO. of element divisions”中输入 15，在“SPACE Space ratio”中输入

-2（这样设置使得直线两端的网格密度较大，中间网格密度较小），单击“Apply”按钮。

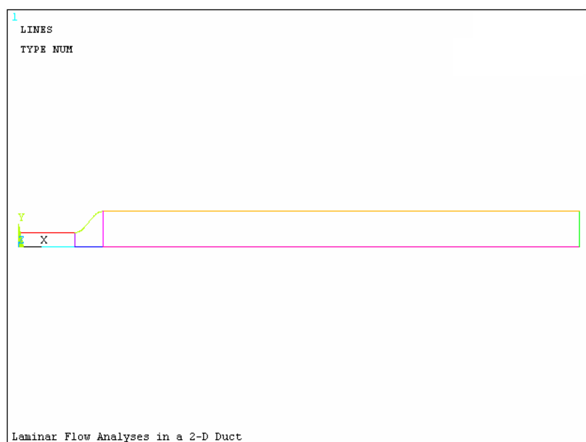



图 5-119 重新绘制直线和曲线



图 5-120 “MeshTool”对话框

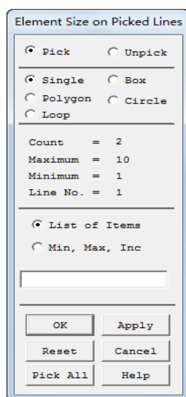



图 5-121 “拾取”对话框

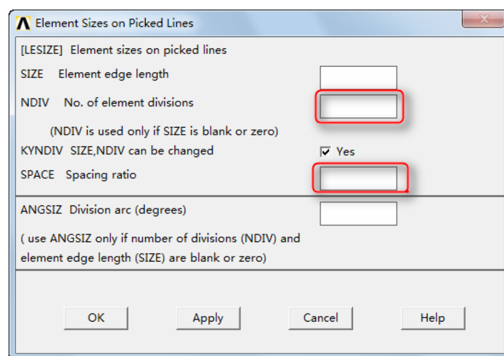



图 5-122 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

❹拾取过渡面积的上下两条曲线和直线，单击“Apply”按钮，弹出如图 5-122 所示对话框。在“NDIV NO. of element divisions”中输入 12，在“SPACE Spacing ratio”中输入 1（这样设置使得直线被均匀划分），单击“Apply”按钮确定。

❺拾取出口矩形的上下两条直线，单击“Apply”按钮，弹出如图 5-122 所示对话框。在“NDIV NO. of element divisions”中输入 45，在“SPACE Spacing ratio”中输入 3（这样设置使得直线左端的网格稀疏，而右边的网格较密集），单击“OK”按钮。

❻注意到出口矩形上边的网格尺寸划分密度没有偏向出口，这需要额外的操作处理。在“MeshTool” 对话框中单击 Lines→Flip 按钮，弹出拾取对话框。拾取出口矩形上边，单击“OK”按钮。

❼定义横向网格密度。在“MeshTool”对话框中单击 Lines→Set 按钮，弹出拾取对话框。拾取图形窗口的 4 条垂直直线，单击“OK”按钮，弹出如图 5-122 所示对话框。在 NDIV NO. of element divisions 中输入 10，在 SPACE Space ratio 中输入-2（这样设置使得直线左端的网格密度较大，中间网格密度较小），单击“OK”按钮。

❽划分单元网格：在 MeshTool 对话框中单击“Mapped”按钮，以选择映射网络划分方式。单击“Mesh”按钮，会弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，进行映射网格划分，得到如图 5-123 所示的网格。



图 5-123 单元网格

❾在工具条建立命令按钮：依次选择 Utility Menu→MenuCtrls→Edit Toolbar，弹出如图 5-124 所示的对话框。在“Selection”中“*ABBR”后输入“tri,/triad,off”，单击“Accept”按钮，在工具条生成“TRI”按钮。单击“Close”按钮关闭“Edit Toolbar”对话框。在“ANSYS”工具条单击“TRI”按钮，执行/trid,off 命令。

❿依次选择 Utility Menu→Plot→Lines 命令，重新绘制直线和曲线。

**05 定义边界条件。**

❶定义来流速度：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Lines，会弹出“拾取”对话框。拾取入口矩形的左边，单击“OK”按钮，弹出“Apply VELO load on lines”对话框，如图 5-125 所示。在“VX Load value”中输入 50，“VY a load value”中输入 0，如图 5-125 所示。单击“OK”按钮关闭“Apply VELO load on lines”对话框。定义来流速度在 X 方向速度为 50in/s，Y 方向速度为 0。

❷定义管道上下边的粘附条件：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Lines，会弹出“拾取”对话框。拾取流场区域上下的 6 条直线或曲线，单击“OK”按钮，会弹出如图 5-125 所示的对话框。在“VX Load value”中输入 0，“VY a load value”中输入 0，单击“OK”按钮关闭“Apply VELO load on lines”对话框。

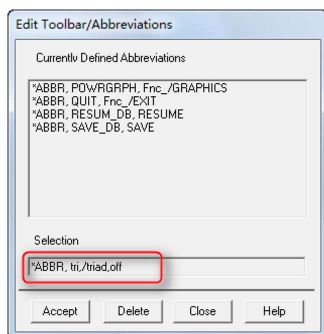



图 5-124 在工具条建立命令按钮

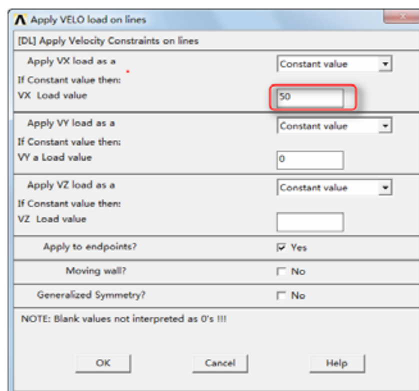



图 5-125 “Apply VELO load on lines”对话框

❸定义出口处的压力边界条件：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Lines，会弹出“拾取”对话框。拾取出口矩形的右边，单击“OK”按钮，弹出“Apply PRES on line”s 对话框，如图 5-126 所

示。在“Apply PRES on lines”对话框中“PRES Pressure value”后输入 0，单击“OK”按钮关闭“Apply PRES on lines”对话框。

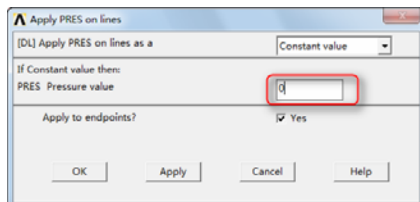



图 5-126 “Apply PRES on lines”对话框

❹得到如图 5-127 所示的边界条件。单击“ANSYS”工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。



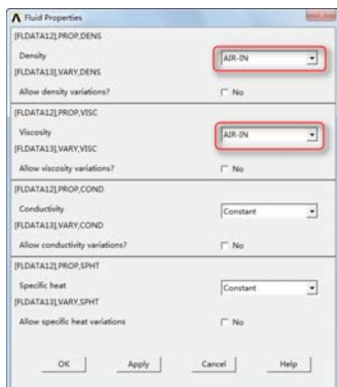
图 5-127 边界条件

## 5.9.2 求解过程

**01 定义流体的物理属性。**

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 5-128 所示。

❷在“Density”和“Viscosity”下拉列表中选择“Air-IN”选项，单击“OK”按钮。在“Flow Properties”对话框中单击“OK”按钮，会弹出“CFD Flow Propertie”s 对话框，如图 5-129 所示。单击“OK”按钮接受默认设置，关闭“CFD Flow Properties”对话框。



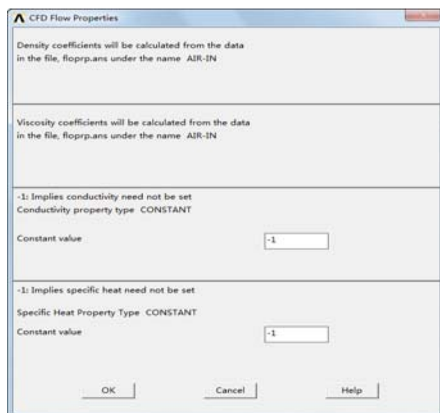




图 5-128 定义流体的物理属性　　图 5-129 CFD Fluid Properties 对话框

**02 设置求解控制选项。**

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Solution Options，会弹出

FLOTRAN Solution Options 对话框，如图 5-130 所示。在“Laminar or Turbulent”下拉列表中选择“Turbulent”选项，单击“OK”按钮确认。

❷依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 5-131 所示。

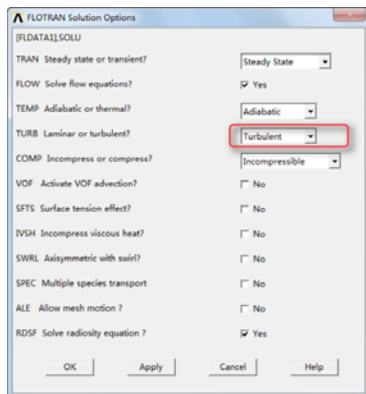



图 5-130 “FLOTRAN Solution Options”对话框

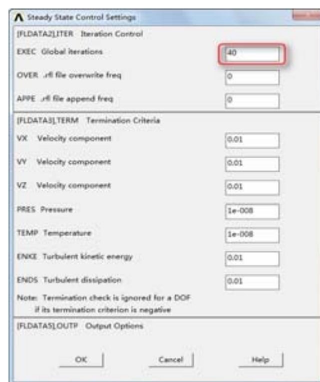



图 5-131 设置求解控制选项

❸在“Steady State Control Settings”对话框中“EXEC Global iterations”后输入 40，如图 5-131 所示，单击“OK”按钮关闭此对话框。

**03 设置参考条件。**

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Flow Environment→Ref Conditions，会弹出“Reference Conditions”对话框，如图 5-132 所示。

❷在“Reference Conditions”对话框中，“Reference pressure”中输入 14.7，“Nominal temperature”中输入 70，“Stagnation（total） temp”中输入 70，“Reference（bulk） temp”中输入 70，“Temp offset from ABS zero”中输入 460。单击“OK”按钮确认并关闭“Reference Conditions”对话框。

❸依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”关闭。迭代曲线如图 5-133 所示。

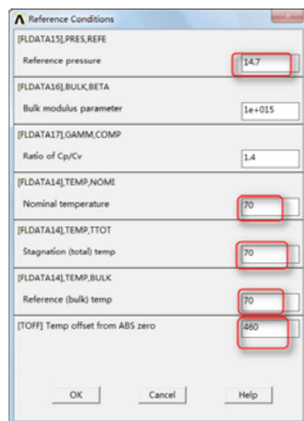



图 5-132 设置参考条件

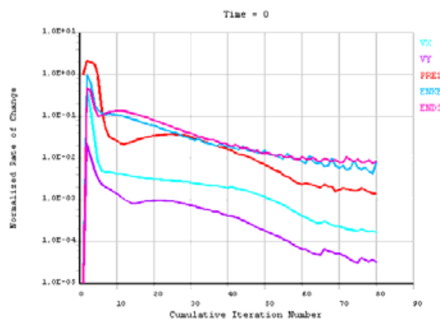



图 5-133 迭代曲线

## 5.9.3 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一个迭代的计算结果。

❷绘制流场的速度分布图：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Vector Plot→Predefined，会弹出“Vector Plot of Predefined Vectors”对话框，如图 5-134 所示。在对话框中选择“DOF Solution→Velocity V”，单击“OK”按钮，会得到流场的速度分布图，如图 5-135 所示。

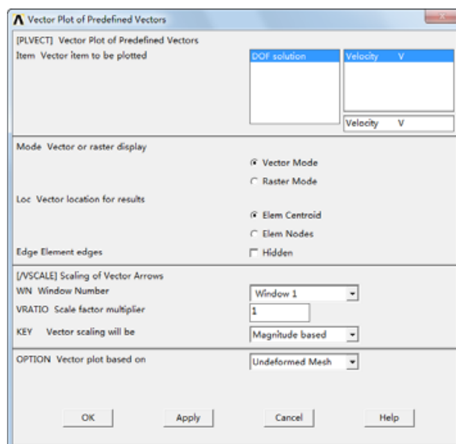



图 5-134 “Vector Plot of Predefined Vectors”对话框

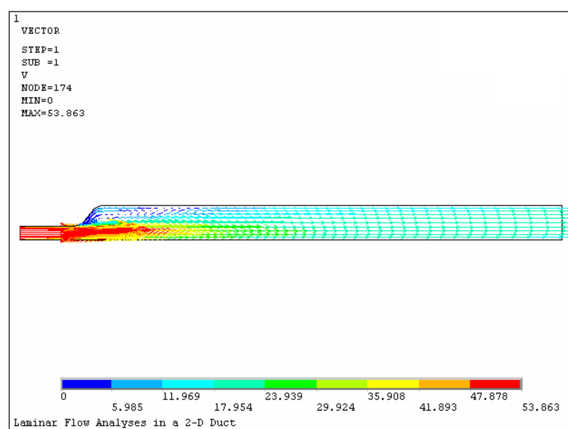



图 5-135 流场的速度分布图

❸绘制流场的总压力（静压和动压）分布图：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 5-136 所示。在对话框中选择“Other FLOTRAN Quantities→Total stagnation

pressure”，单击“OK”按钮，会得到流场的总压力（静压和动压）分布图，如图 5-137 所示。

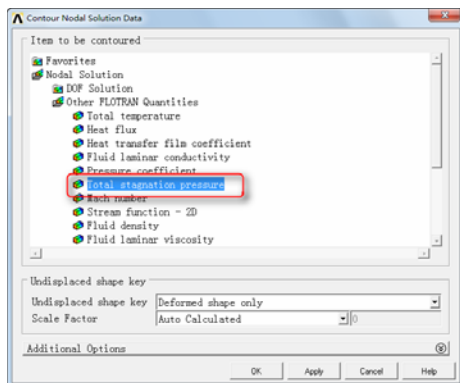



图 5-136 “Contour Nodal Solution Data”对话框

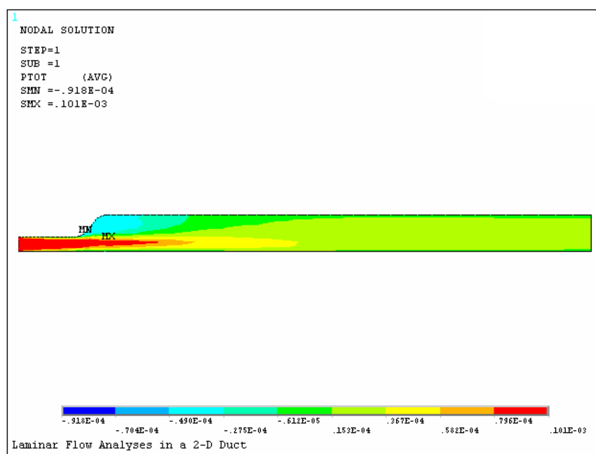



图 5-137 流场的总压力分布图

❹获得流体质点的运动轨迹动画：依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Defi Trace Pt，会弹出“拾取”对话框。拾取如图 5-138 所示的几个点（大概位置就可以），单击“OK”按钮关闭对话框。




图 5-138 选取的点

❺依次选择 Utility Menu→PlotCrls→Animate→Particle Flow，会弹出“Animate Flow Trace”对话框，如图 5-139 所示。在对话框中选择“DOF solution→Velocity VX”，单击“OK”按钮，会得到流体质点的运动轨迹动画。

❻绘制出口处的流速分布：依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Define Path→By Nodal，会弹出“拾取”对话框。依次拾取出口处的下端节点和上端

节点两个点，单击“OK”按钮，会弹出“By Nodes”对话框，如图 5-140 所示，在“Name Define Path Name”后输入路径名称“outlet”，单击“OK”按钮关闭对话框。

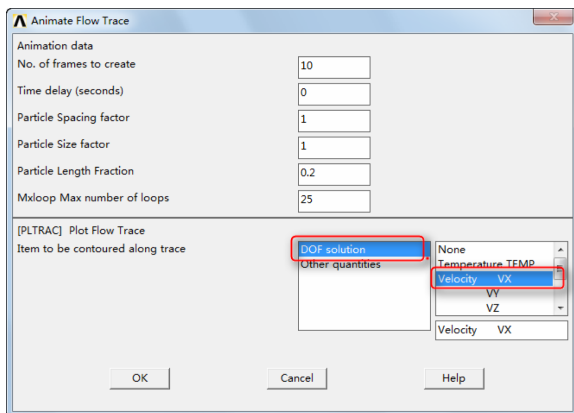



图 5-139 “Animate Flow Trace”对话框

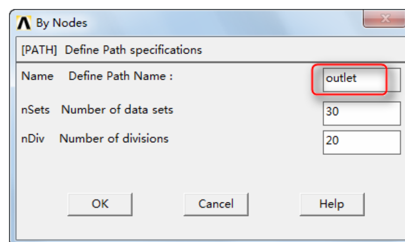



图 5-140 “By Nodes”对话框

❼依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Map onto Path，会弹出“Map Result Items onto Path”对话框，如图 5-141 所示。在“Lab User label for item”后输入“velocity”，在列表中选择“DOF Solution→Velocity VX”，单击“OK”按钮关闭对话框。

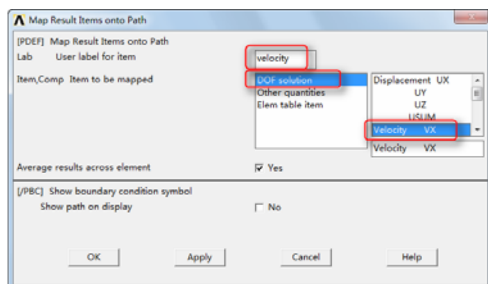



图 5-141 Map Result Items onto Path 对话框

❽依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operation→Plot Path Items→On Graph，会弹出“Plot of Path Items On Graph”对话框，如图 5-142 所示。在列表中选择“velocity”选项，单击“OK”按钮确认，会得到出口处流速的分布，如图 5-143 所示。

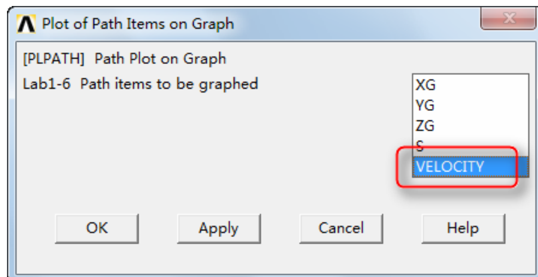



图 5-142 “Plot of Path Items on Graph”对话框

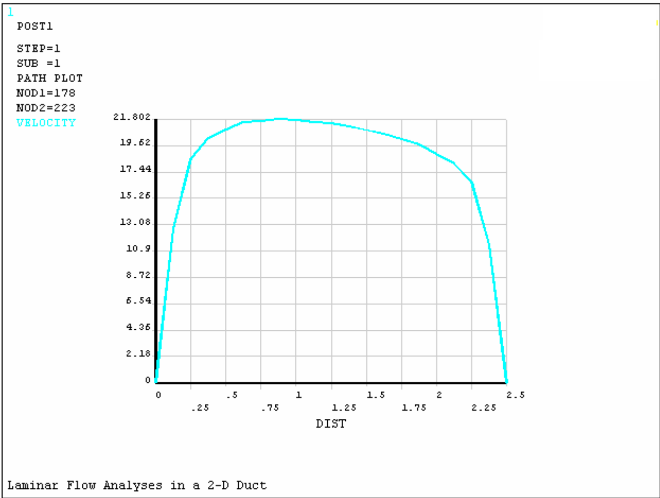



图 5-143 出口处流速的分布

## 5.9.4 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

# 第 6 章

# 可压缩流动 FLOTRAN 分析及实例

流体密度变化不能忽略的流动称为可压缩流动。本章中对可压缩流动 FLOTRAN 分析作了简单的介绍，主要包括物理性质的计算、边界条件的设置、网格划分和解决方案的选择。

本章中给出了喷管内超音速可压缩流动分析的详细实例，读者可以通过该实例分析加深理解。

学 习 要 点

- 了解可压缩流动 FLOTRAN 分析的基本概念
- 通过实例加深对可压缩流动 FLOTRAN 分析的理解

# 6.1 可压缩流动FLOTRAN 分析简介

可压缩流动是流体密度变化不能忽略的流动。其实流体都具有程度不同的可压缩性，在流动中，流体速度变化必伴随压强变化，而压强变化又引起密度变化。液体的压缩性很小，流动中的压强变化不足以引起明显的密度变化（水下爆炸、水击等情况除外），因而液体流动一般都属于不可压缩流动。

气体流动中的密度变化可按欧拉方程分析

$$d\rho/\rho=-2Ma\,dv/v$$

式中，*Ma* 是马赫数；$\rho$、$v$ 分别是密度和速度。

若 *Ma* 很小，则密度变化可以忽略，属不可压缩流动范畴。若 *Ma* 不很小，如大于 0.3，则密度变化不可忽略，属可压缩流动。在不可压缩流动中，流动参数通常仅为速度和压强；但在可压缩流动中，还须增加密度，并伴随温度。变量增加了，控制方程的数目和求解的复杂性也增加了。可压缩流动按马赫数大小可分为亚声速流动（*Ma*＝0.3～0.8）、跨声速流动（*Ma*＝0.8～1.2）、超声速流动(*Ma*＝1.2～5.0)和高超声速流动（*Ma*＞5.0）。高速飞行器和航天器的飞行马赫数大多远超过 0.3，其绕流问题都必须按可压缩流动的理论处理。

由于存在湍流，可随意激活可压缩算法。实际上对于所有的可压缩分析都应激活湍流(尽管原则上对于高马赫数，雷诺数肯定能在线性范围内)。当马赫数低到 0.3 时可能在不可压缩和可压缩算法的结果（压力、密度、速度分布）中存在差异。当马赫数高达 0.7 时，差异相当明显。

声速是流体的状态方程及其热力学温度的函数。对于恒定密度的流体来说，声速是无穷大的。对于理想气体，不管是否使用了不可压缩或可压缩求解算法，关系式均为

$$C=\sqrt{\gamma RT}$$

式中，$R$ 为通用气体常数；$\gamma$ 为比热容之比（$C_p/C_v$）；$T$ 为热力学温度。

对于 2-D 可压缩分析，推荐使用四边形单元的网格。对于 3-D 情况，推荐使用六边形单元。

## 6.1.1 物理性质计算

可压缩算法考虑了流体加速时的动能变化。公式里使用的是总温。

在一个绝热分析中，整个问题区域中总温保持不变。可使用以下方法确定温度：

命令：FLDATA14,TEMP,TTOT,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions

于是能量守恒定律在热存储（静态温度）和动能之间达到平衡。

总的（停滞）温度是流体等熵地达到零速度后流体的温度。有代表性地选择入口处

的条件。了解入口处静态温度和速度的大小|V|后能够通过以下方程计算总温

$$T_0 = T_{\text{static}} + \frac{|V^2|}{2C_{\text{p}}}$$

在根据马赫数($Ma$)计算时下面这个关系式有时是有用的

$$T_0 = T\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2\right)$$

必须确定比热容和比热容之比 $\gamma$，为了输入这个比值，可使用以下方法：

命令：FLDATA17,GAMM,COMP

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions

ANSYS 程序使用得到的静态温度和绝对压力根据状态方程来计算密度。



与不可压缩分析不同，在冰冻处于早期整体迭代时的密度计算可能是一种优势，可压缩分析会自动包括可变的密度选项。这些类型的分析中的另一个区别就是，对于可压缩分析，初始性质是根据算得的静态温度而不是名义温度计算的。

## 6.1.2 边界条件

需要知道入口处的马赫数、速度、质量流量或静态温度。使用上述方程时，知道速度或马赫数能够计算适当的总温。如果仅知道质量流量，就能够根据参考压力近似得到入口处的压力，并且能和状态方程一起使用来近似得到入口密度，然后得到速度。

对于亚音速问题，边界条件方案与不可压缩流动问题相似，即入口处的速度或压力及出口处的压力。然而，对于亚音速问题，方程变化的状态和下游边界条件的效应并不能沿上游传播。在这种情况下，通常同时将压力和速度施加到上游位置，剩下下游边界没有确定。

对于外部流动问题，施加自由流时通常和远场边界条件一样。一般在这些边界处确定压力非常有用。然而随着解发展，诸如冲击波等的现象就会传递到这些边界上，在这种情况下，应该去掉边界条件，否则就会对随后的质量平衡产生不利的影响。同样地，如果边界非常接近重要的区域（例如螺旋桨，流动移动很快），边界附近的速度解就会大于自由流的速度，在这种情况下，速度边界条件的一个较好的选择就是对称条件（仅确定垂直于边界的速度为零）。

如果是热问题，ANSYS 就会把所有施加的边界条件设为总温，而不是静态温度。相反，如果是绝热问题，热边界条件就会忽略不计。

如果对于一个热可压缩问题使用热不可压缩解作为起始点，就必须改变边界条件，将确定为总温。

### 6.1.3 结构和非结构网格

正如本章开头所说，对于 2-D 可压缩流动问题最好使用四边形网格。如图 6-1 所示。

在 2-D 可压缩分析中，网格 a（即四边形网格）会产生最精确的解。网格 b（即无规则形状）的三角网格产生 2-D 解而不是 1-D 解。网格 c（对称形状的三角网格）产生 1-D 的解。

同样地，在 3-D 可压缩分析中，六边形网格（相当于 2-D 四边形网格）会产生最好的解。无规则形状的四面体网格（网格 b 的 3-D 等价物）只会产生 3-D 解，而不是 1-D 解。四面体对称网格，即网格 c 的 3-D 等价物，会产生 1-D 解。

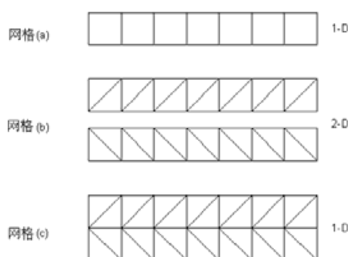



图 6-1 三类网格

### 6.1.4 求解方案

因为超音速问题的非椭圆本质，必须当作假瞬态或瞬态问题求解可压缩分析。当不考虑发展中的瞬态的随时间的变化时，假瞬态方法就非常合适，在这种方法中，要把惯性松弛施加到压力方程中。

对于理想气体，总是根据包括绝对压力和绝对温度在内的状态方程计算密度。正因为这样，在迭代过程中必须防止出现绝对压力和绝对温度的负值，因为它们会产生负的密度。一种方法是使用一个收敛的不可压缩解作为起始点，另一种方法就是使用封口来确定最小 FLOTRAN（相对）压力。例如，为了将绝对压力保持在最小值 1Pa，对于以 14.7 Pa 的参考压力，要把相对压力封在-13.7 Pa。封口不是一种稳定的控制方法，只凭借它并不能控制求解进程，它仅仅有助于预防出现负的性质。

人为速度有助于预防出现负的速度，在开始分析时对其进行设置，并且为了分析能够进行下去，就必须使人为速度缓慢降低。如果运行过程中增加速度就可能会出现发散。要求的人为速度的大小可以变化很大。初始值越小，需要的整体迭代就越少。但是如果人为速度不够大，可能会出现负的静态温度。可以使用线性和有效粘度来测量一个好的初始值。初始值一般比有效粘度高出好几个数量级，而有效粘度又反过来初始化为多倍的线性值。一般说来，比线性粘度高出 3 或 4 个数量级的值是一个非常恰当的初始值。

在可压缩问题中，如果人为速度没有去掉的话，最终解为人为速度的函数。因此，达到稳定以后，在重复继续进行分析过程中，要逐渐去掉人为速度。

通过增大矩阵方程中主对角线上的元素，惯性松弛有助于使解稳定下来。对于压力，所用的值一般介于 $1.0\times10^{-3}$（不太松弛）～$1.0\times10^{-6}$（太松弛）之间。值较小时对角线

上元素较大，这样方程就稳定了，但代价是收敛较慢，因为并没有太强调方程中存在的交叉耦合项的影响。

和人为速度不同，如果问题是收敛的，惯性松弛对解并没有影响，这样就不必去掉了。最好在以后的分析中将其量级减小到 $1\times10^{-4}$ 范围内。可以通过观察 Jobname.DBG 文件中参数 RTR 的性能来评价松弛的影响。

# 6. 2 喷管内超音速可压缩流动分析

## 6.2.1 问题描述

喷管的入口半径为 2.432cm，中间瓶颈处半径为 0.5cm，出口处半径为 0.8cm。喷管内入口压力为 6.13769MPa，出口压力为 0。具体尺寸如图 6-2 所示。

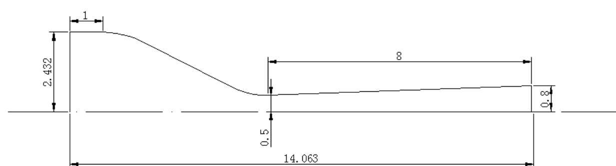



图 6-2 喷管结构示意图

这个可压缩流动分析是利用 FLUID141 2-D 流体-热单元的湍流分析。假定在出口处是大气压力，临界温度为 550K，入口压力的边界条件为 6.13769MPa，出口压力的边界条件为 0。沿对称轴 VY 方向的速度分量为 0，沿外表面 VX 和 VY 方向的速度分量为 0。开始时先假设粘度为 10 进行 20 步的迭代计算，然后将粘度设为 1、0.1、0.01、0.001、0.0001 和 0.00001 分别进行 20 步的迭代计算，总共进行 140 步的迭代计算。然后将粘度假设为 0 进行 160 步的迭代计算。进行 300 步的迭代计算后，粘度逐渐降到了 0。增加动量和压力的惯性松弛因子继续 100 步的迭代计算。最后，在进行 400 步的迭代计算后，使溶液的动量和压力惯性松弛因子增加到较高的值，曲线段得到收敛。

## 6.2.2 前处理

**01 定义工作名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“Compressible Flow”，并将“NEW log and error files？”设置为“Yes”，如图 6-3 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

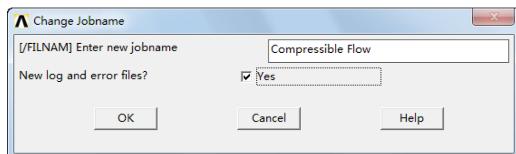



图 6-3 “Change Jobname”对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Compressible Flow in a Converging Diverging”，如图 6-4 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

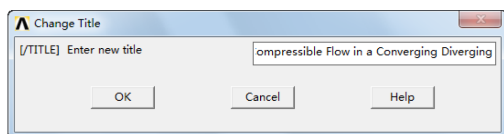



图 6-4 “Change Title”对话框

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 6-5 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

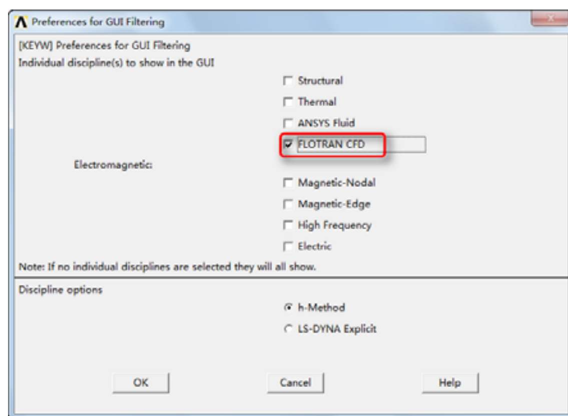



图 6-5 “Preferences for GUI Filtering”对话框

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，会弹出“Element Types”对话框，如图 6-6 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 6-7 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。




图 6-6 “Element Types”对话框

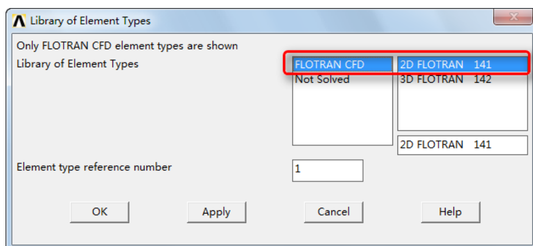



图 6-7 “Library of Element Types”对话框

❹单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

03 建立几何模型。

❶依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，会弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 6-8 所示，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 1，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 0 和 2.432。

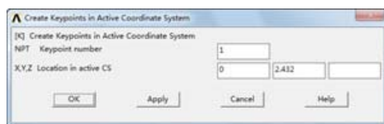



图 6-8 “Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框

❷单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 2 ，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 0 和 0。

❸单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 3，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 1 和 2.432。

❹单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 4，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 1 和 0。

❺单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 5，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 2 和 2.232。

❻单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 6，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 2 和 0。

❼单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 7，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 5 和 0。

❽单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 8，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 5 和 0.7。

❾单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 9，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 6 和 0。

❿单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 10，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 6 和 0.5。

⓫单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 11，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 14 和 0。

⓬单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，在“Keypoint number (NPT)”输入框中输入 12，在“Location in active CS (X and Y)”输入框中分别输入 14 和 0.8，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓭依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，如图 6-9 所示，单击“LINE Line numbers”后的方框，使 off 状态变为 on，单击“OK”按钮关闭该对话框。

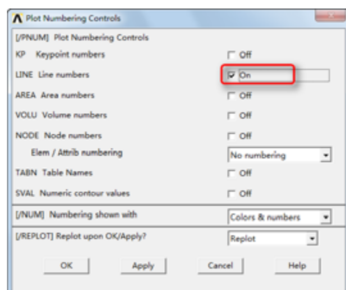



图 6-9 “Plot Numbering Controls”对话框

⓮依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“The Lines in Active Coord”对话框，用鼠标依次选取关键点 2 和 4。

⓯单击“Apply”按钮，会再次弹出“The Lines in Active Coord”对话框，用鼠标依次选取关键点 3 和 4。

⓰单击“Apply”按钮，会再次弹出“The Lines in Active Coord”对话框，用鼠标依次选取关键点 1 和 3。

⓱单击“Apply”按钮，会再次弹出“The Lines in Active Coord”对话框，用鼠标依次选取关键点 1 和 2。

⓲单击“Apply”按钮，会再次弹出“The Lines in Active Coord”对话框，用鼠标依次选取关键点 5 和 8，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines，会弹出“Line Tangent to 2 Lines”对话框，用鼠标选取线段 3。

⓴单击“Apply”按钮，会再次弹出“Line Tangent to 2 Lines”对话框，用鼠标拾取关键点 3。

㉑单击“Apply”按钮，会再次弹出“Line Tangent to 2 Lines”对话框，用鼠标拾取线段 5。

㉒单击“Apply”按钮，会再次弹出“Line Tangent to 2 Lines”对话框，用鼠标拾取关键点 5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉓依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出 “The Lines in Active Coord”对话框，用鼠标依次选取关键点 10 和 12，

单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉔依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines，会弹出“Line Tangent to 2 Lines”对话框，用鼠标选取线段 5。

㉕单击“Apply”按钮，会再次弹出“Line Tangent to 2 Lines”对话框，用鼠标拾取关键点 8。

㉖单击“Apply”按钮，会再次弹出“Line Tangent to 2 Lines”对话框，用鼠标拾取线段 7。

㉗单击“Apply”按钮，会再次弹出“Line Tangent to 2 Lines”对话框，用鼠标拾取关键点 10，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉘依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出 “The Lines in Active Coord”对话框，用鼠标依次选取关键点 4 和 6。

㉙单击“Apply”按钮，会再次弹出“The Lines in Active Coord”对话框，用鼠标依次选取关键点 6 和 7。

㉚单击“Apply”按钮，会再次弹出“The Lines in Active Coord”对话框，用鼠标依次选取关键点 7 和 9。

㉛单击“Apply”按钮，会再次弹出“The Lines in Active Coord”对话框，用鼠标依次选取关键点 9 和 11，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉜依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，会弹出“Create Area thru KPs”对话框，用鼠标依次拾取关键点 2、4、3、1。

㉝单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Area thru KPs”对话框，用鼠标依次拾取关键点 4、6、5、3。

㉞单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Area thru KPs”对话框，用鼠标依次拾取关键点 6、7、8、5。

㉟单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Area thru KPs”对话框，用鼠标依次拾取关键点 7、9、10、8。

㊱单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Area thru KPs”对话框，用鼠标依次拾取关键点 9、11、12、10，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㊲依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗口将变成白色，窗口将显示所生成的几何模型，如图 6-10 所示。

**04 划分网格。**

❶依次选择 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，会弹出“Scalar Parameters”对话框，如图 6-11 所示，在“Selection”输入框中依次输入

```
ntran=24;
rtran=10;
na=10;
nb=10;
nc=25;
```

nd=10;

ne=100;

re=-1.5。

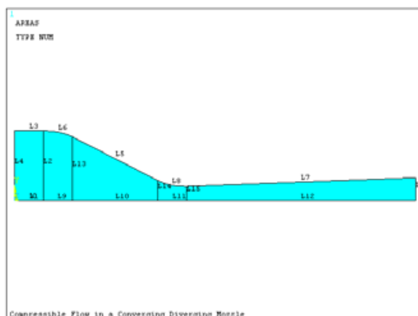



图 6-10 生成的几何模型



每输入一个单击一次“Apply”按钮。

❷单击“Close”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 4。

❹单击“Apply”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入“ntran”，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入“rtran”。

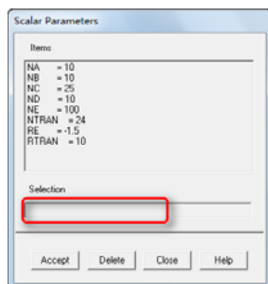



图 6-11 “Scalar Parameters”对话框

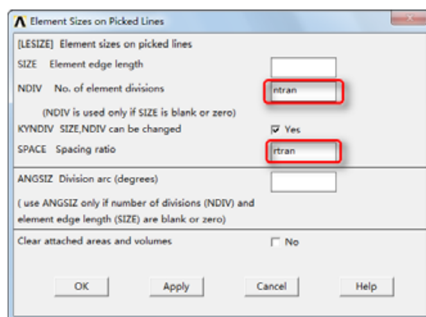



图 6-12 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

❺单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 2。

❻单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入“ntran”，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入“rtran”。

❼单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 13。

❽单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图

6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入“ntran”，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入“1/rtran”。

❾单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 14。

❿单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 ntran，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入 1/rtran。

⓫单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 15。

⓬单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入“ntran”，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入“1/rtran”。

⓭单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 16。

⓮单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入“ntran,” 在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入“1/rtran”。

⓯单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 1。

⓰单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入“na”，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入 1。

⓱单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 3。

⓲单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 na，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入 1。

⓳单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 6。

⓴单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 nb，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入 1。

㉑单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 9。

㉒单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 nb，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入 1。

㉓单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标

标拾取线段 5。

㉔单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 nc，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入 1。

㉕单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 10。

㉖单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 nc，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入 1。

㉗单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 8。

㉘单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 nd，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入 1。

㉙单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 11。

㉚单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 nd，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入 1。

㉛单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 7。

㉜单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 ne，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入 re。

㉝单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，用鼠标拾取线段 12。

㉞单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 6-12 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 ne，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入 re，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉟依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided，会弹出“Mesh Areas”对话框，单击“Pick All”按钮，生成的网格模型如图 6-13 所示。

**05** 定义边界条件。

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers，会弹出“Compress Numbers”对话框，如图 6-14 所示，在“Label Item to be compressed”后的下拉框中选择“Nodes”。

❸单击“Apply”按钮，再次弹出“Compress Numbers”对话框，在“Label Item to be

compressed”后的下拉框中选择“Elements”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Plot→Lines。

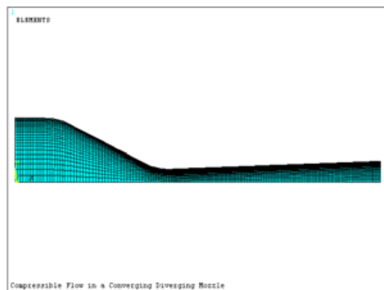



图 6-13 生成的网格模型

❺依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 6-15 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，用鼠标选择线段 L1、L9、L10、L11、L12，单击“OK”按钮关闭对话框。

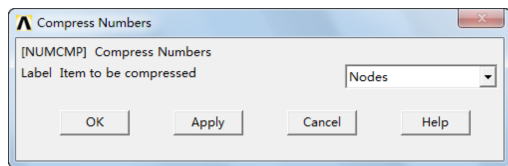



图 6-14 “Compress Numbers”对话框




图 6-15 “Select Entities”对话框

❻依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 6-16 所示。单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on nodes”对话框，如图 6-17 所示。

❽在“Apply VELO load on nodes”对话框中，在“VY a Load value”输入框中输入 0，如图 6-17 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 6-15 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，用鼠标选择线段 L4，单击“OK”按钮关闭对话框。

❿依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 6-16 所示。单击“OK”按钮关闭该对话框。

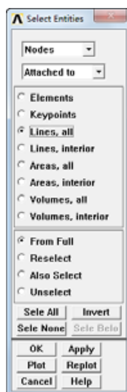



图 6-16 “Select Entities”对话框

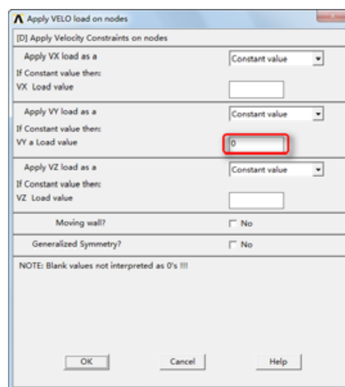



图 6-17 “Apply VELO load on nodes”对话框

⑪依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Nodes，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框，如图 6-18 所示。

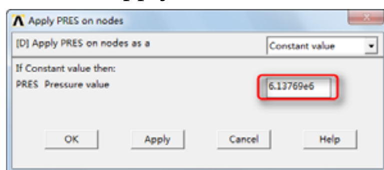



图 6-18 “Apply PRES on nodes”对话框

⑫在“Apply PRES on nodes”对话框中，在“PRES Pressure value”输入框中输入 6.13769e6，如图 6-18 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑬依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 6-15 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，用鼠标选择线段 L3、L5、L6、L7、L8，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑭依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 6-16 所示。单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑮依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on nodes”对话框，如图 6-17 所示。

⑯在“Apply VELO load on nodes”对话框中，在“VX a Load value”输入框中输入 0，在“VY a Load value”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑰依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 6-15 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，用鼠标选择线段 L16，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑱依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第

一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 6-16 所示。单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Nodes，会弹出“Apply PRES on Nodes”对话框，如图 6-18 所示。

⓴“Apply PRES on nodes”对话框中，在“PRES Pressure value”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。施加边界条件后的模型如图 6-19 所示。

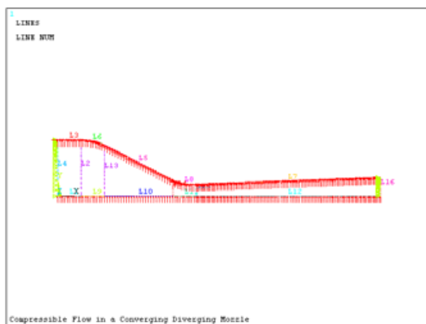



图 6-19 施加载荷后的模型

## 6.2.3 求解

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 6-20 所示。

❸在“Fluid Properties”对话框中，在“Density（DENS），Viscosity（VISC），Conductivity（COND）”和“Specific heat（SPHT）”后的选择列表中选择“AIR-CM”，将“Allow density variations？”后的“No”状态改变为“Yes”状态，如图 6-20 所示。

❹单击“Apply”按钮，会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 6-21 所示，确认信息是否正确，单击“OK”按钮关闭该对话框。

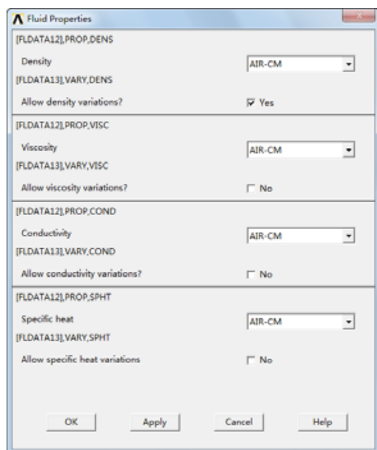



图 6-20 “Fluid Properties”对话框

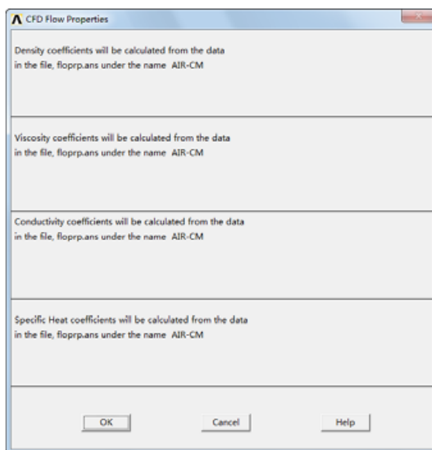



图 6-21 “CFD Flow Properties”对话框

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions，会弹出“Reference Conditions”对话框，如图 6-22 所示。在“Reference pressure”输入框中输入 1013250，在“Nominal temperature”和“Stagnation (total) temperature”输入框中输入 550，其他采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 6-23 所示。在“TURB Laminar or turbulent”后的选择列表中选择“Turbulent”，在“COMP　Incompress or compress”后的选择列表中选择“Compressible”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

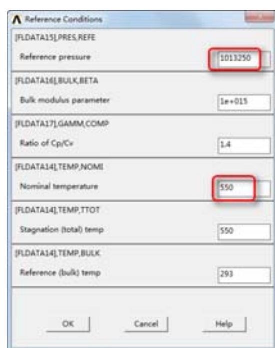



图 6-22 “Reference Conditions”对话框

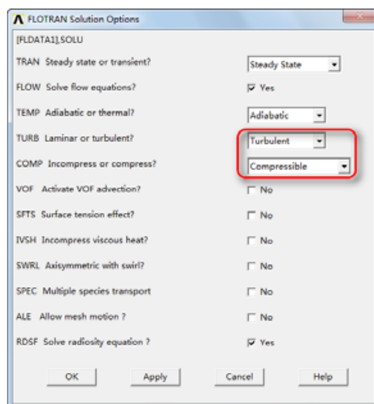



图 6-23 “FLOTRAN Solution Options”对话框

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Contr→PRES Solver CFD，会弹出“PRES Solver CFD”对话框，选择“Precond conj res”，如图 6-24 所示。

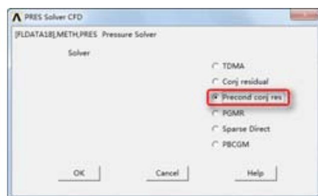



图 6-24 “PRES Solver CFD”对话框

❽单击“OK”按钮，会弹出“Semi Direct Solver Options for Pressure”对话框，如图 6-25 所示，采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Prop Relaxation，会弹出“Property Relaxation”对话框，如图 6-26 所示，在“DENS　Density relaxation”输入框中输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❿依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→MIR Stabilization，会弹出“MIRStabilization”对话框，如图 6-27 所示，在“MOME Momentum Equation”和“TURB Turbulence Equation”的输入框都输入 0.2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

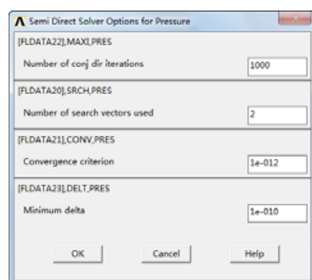


图 6-25 “Semi Direct Solver Options for Pressure”对话框

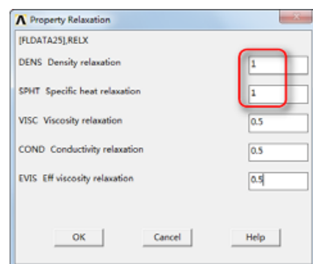


图 6-26 “Property Relaxation”对话框

⓫依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms，会弹出“Stability Parameters”对话框，如图 6-28 所示，在“MOME Momentum inertia”输入框中输入 1，在“PRES Pressure inertia”输入框中输入 1e-4，在“VISC Artificial viscosity”输入框中输入 10，单击“OK”按钮关闭该对话框。

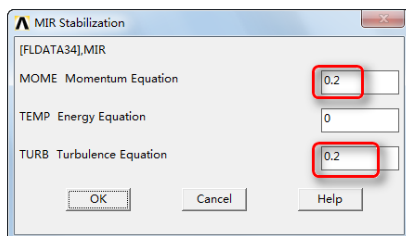



图 6-27 “MIR Stabilization”对话框

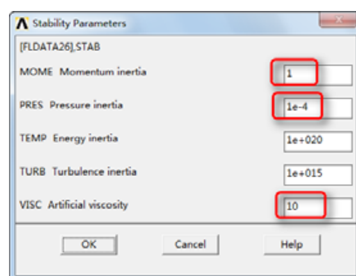



图 6-28 “Stability Parameters”对话框

⓬依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 6-29 所示，在“EXEC Global iterations”输入框中输入 20，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓭依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，粘度为 10 的 20 步迭代计算后，会弹出“Note”对话框，如图 6-30 所示，单击“Close”按钮关闭该对话框，粘度为 10 的 20 步迭代曲线如图 6-31 所示。

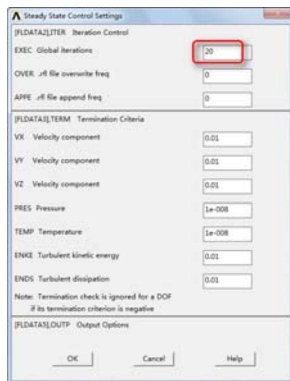


图 6-29 “Steady State Control Settings”对话框

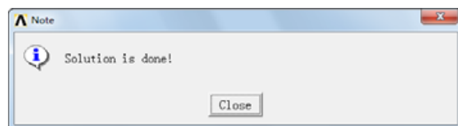



图 6-30 “Note”对话框

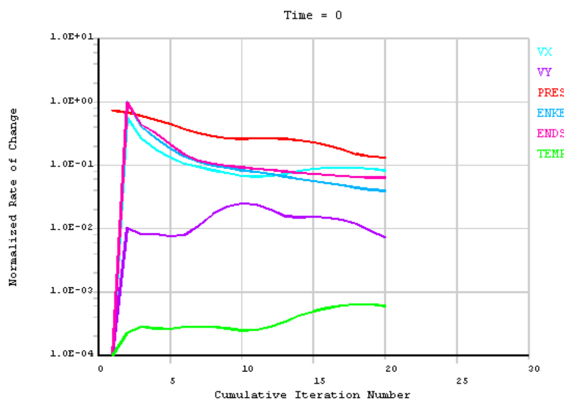



图 6-31　粘度为 10 的 20 步迭代曲线

⑭依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms，会弹出“Stability Parameters”对话框，如图 6-28 所示，在“VISC Artificial viscosity”输入框中输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑮依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，粘度为 1 的 20 步迭代计算后，会弹出“Note”对话框，如图 6-30 所示，单击“Close”按钮关闭该对话框。粘度为 1 的 20 步的迭代曲线如图 6-32 所示。

⑯依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms，会弹出“Stability Parameters”对话框，如图 6-28 所示，在“VISC Artificial viscosity”输入框中输入 0.1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑰依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，粘度为 0.1 的 20 步迭代计算后，会弹出“Note”对话框，如图 6-30 所示，单击“Close”按钮关闭该对话框。粘度为 0.1 的 20 步的迭代曲线如图 6-33 所示。

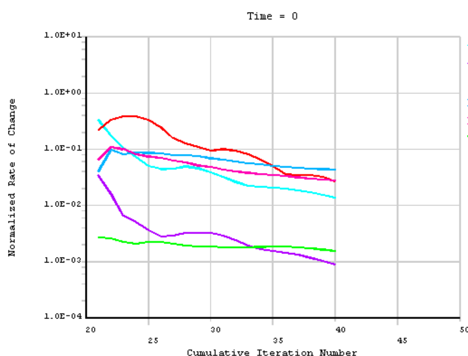



图 6-32　粘度为 1 的 20 步迭代曲线

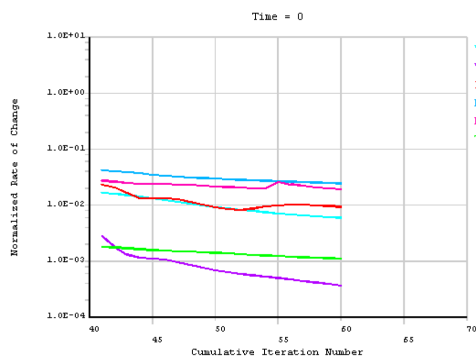



图 6-33　粘度为 0.1 的 20 步迭代曲线

⑱依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms，会弹出“Stability Parameters”对话框，如图 6-28 所示，在“VISC Artificial viscosity”输入框中输入 0.01，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑲依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，粘度为 0.01 的 20 步迭代计算

后，会弹出“Note”对话框，如图 6-30 所示，单击“Close”按钮关闭该对话框。粘度为 0.01 的 20 步的迭代曲线如图 6-34 所示。

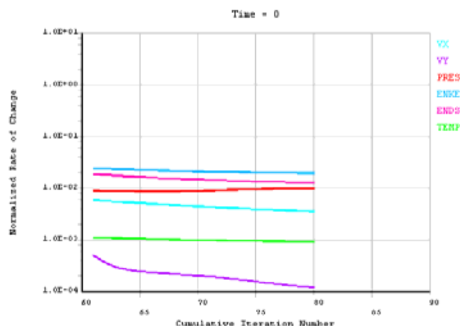



图 6-34 粘度为 0.01 的 20 步迭代曲线

⑳依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms，会弹出“Stability Parameters”对话框，如图 6-28 所示，在“VISC Artificial viscosity”输入框中输入 0.001，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉑依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，粘度为 0.001 的 20 步迭代计算后，会弹出“Note”对话框，如图 6-30 所示，单击“Close”按钮关闭该对话框。粘度为 0.001 的 20 步的迭代曲线如图 6-35 所示。

㉒依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms，会弹出“Stability Parameters”对话框，如图 6-28 所示，在“VISC Artificial viscosity”输入框中输入 0.0001，单击“OK”按钮关闭该对话框。

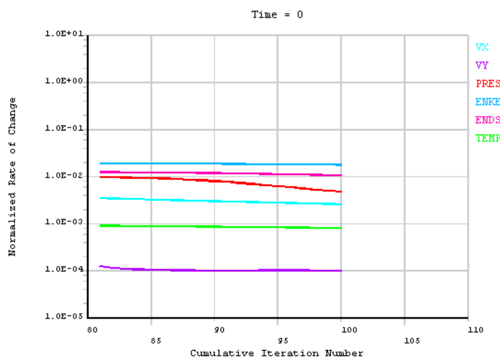



图 6-35 粘度为 0.001 的 20 步迭代曲线

㉓依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，粘度为 0.0001 的 20 步迭代计算后，会弹出“Note”对话框，如图 6-30 所示，单击“Close”按钮关闭该对话框， 粘度为 0.0001 的 20 步的迭代曲线如图 6-36 所示。

㉔依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms，会弹出“Stability Parameters”对话框，如图 6-28 所示，在“VISC Artificial viscosity”输入框中输入 0.00001，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉕依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，粘度为 0.00001 的 20 步迭代计算后，会弹出“Note”对话框，如图 6-30 所示，单击“Close”按钮关闭该对话框，粘度为 0.00001 的 20 步的迭代曲线如图 6-37 所示。

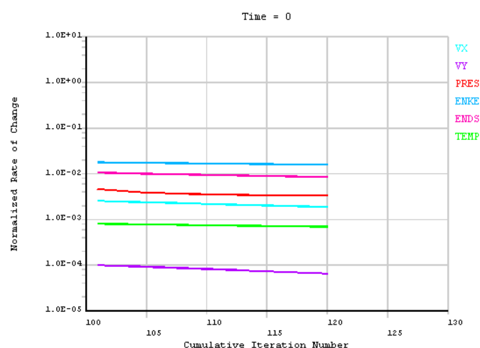



图 6-36 粘度为 0.0001 的 20 步迭代曲线

㉖依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms，会弹出“Stability Parameters”对话框，如图 6-28 所示，在“VISC Artificial viscosity”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉗依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 6-29 所示，在“EXEC Global iterations”输入框中输入 160，单击“OK”按钮关闭该对话框。

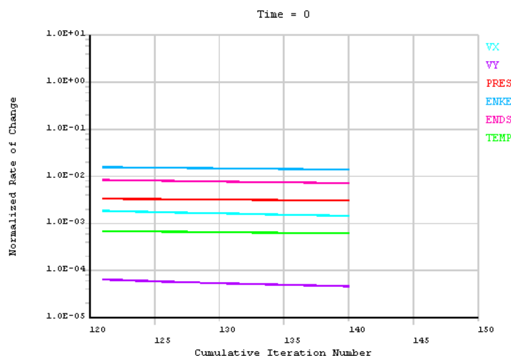



图 6-37 粘度为 0.00001 的 20 步迭代曲线

㉘依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，粘度为 0 的 160 步迭代计算后，会弹出“Note”对话框，如图 6-30 所示，单击“Close”按钮关闭该对话框。粘度为 0 的 160 步的迭代曲线如图 6-38 所示。

㉙依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms，会弹出“Stability Parameters”对话框，如图 6-28 所示，在“MOME Momentum inertia”输入框中输入 10，在“PRES Pressure inertia”输入框中输入 1e-2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉚依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出

“Steady State Control Settings”对话框，如图 6-29 所示，在“EXEC Global iterations”输入框中输入 100，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉛依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，粘度为 0 改变其他条件之后的 100 步迭代计算后，会弹出“Note”对话框，如图 6-30 所示，单击“Close”按钮关闭该对话框，粘度为 0 的 100 步的迭代曲线如图 6-39 所示。

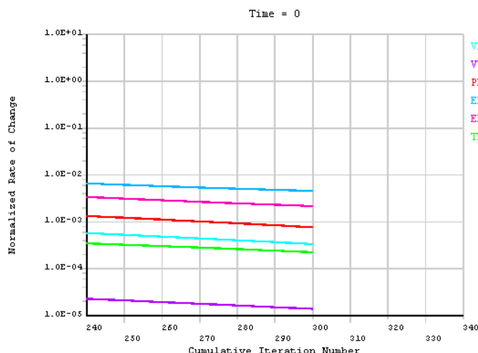



图 6-38 粘度为 0 的 160 步迭代曲线

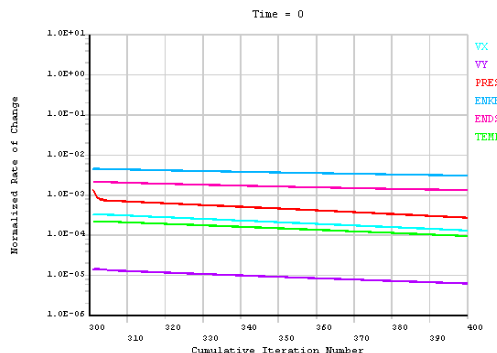



图 6-39 粘度为 0 的 100 步迭代曲线

㉜依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Stability Parms，会弹出“Stability Parameters”对话框，如图 6-28 所示，在“MOME Momentum inertia”输入框中输入 1e15，在“PRES Pressure inertia”输入框中输入 1e15，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉝依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 6-29 所示，在“EXEC Global iterations”输入框中输入 400，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉞依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，粘度为 0 改变其他条件之后的 400 步迭代计算后，会弹出“Note”对话框，如图 6-30 所示，单击“Close”按钮关闭该对话框。粘度为 0 的 400 步的迭代曲线如图 6-40 所示。

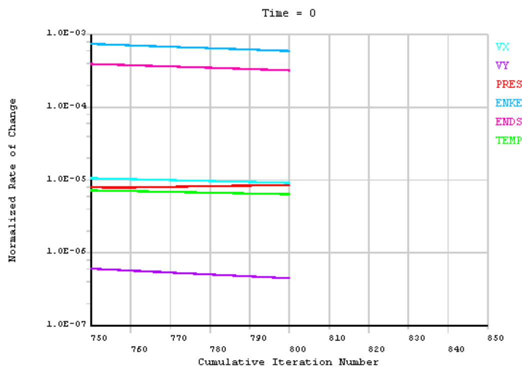



图 6-40 粘度为 0 的 400 步迭代曲线

## 6.2.4 后处理

❶依次选择 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set。

❷依次选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 6-41 所示。

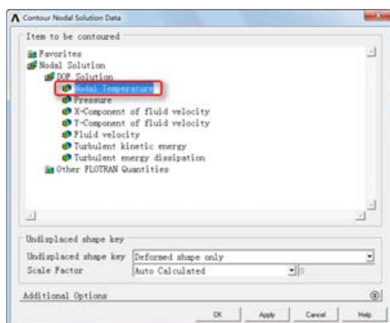


图 6-41 “Contour Nodal Solution Data”对话框

❸在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Nodal Temperature，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-42 所示的流体纵截面温度场分布等值线图。

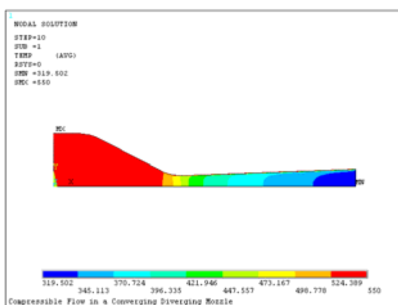


图 6-42 流体纵截面温度场分布等值线图

❹重复第❷步操作。在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Pressure，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-43 所示的流体纵截面压力场分布等值线图。

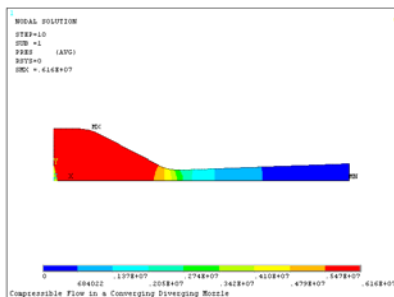


图 6-43 流体纵截面压力场分布等值线图

❺重复第❷步操作。在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→X-Component of fluid velocity，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-44 所示的流体轴向速度场分布等值线图。

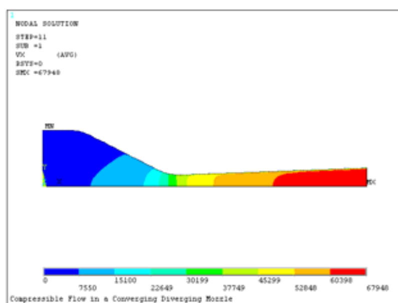



图 6-44 流体轴向速度场分布等值线图

❻重复第❷步操作。在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Turbulent kinetic energy，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-45 所示的流体轴向湍流动能分布等值线图。

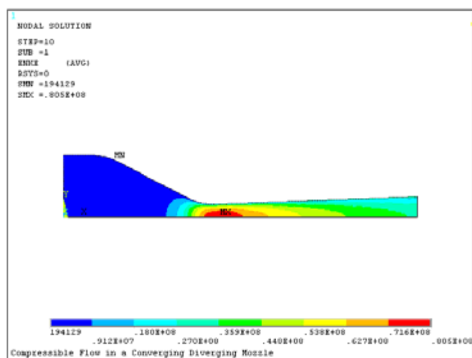



图 6-45 流体轴向湍流动能分布等值线图

## 6.2.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

# 第 7 章

# VOF 模型分析及实例

本章主要介绍了 VFRC 载荷、VOF 模型分析的环境条件设置以及实例。进行 VOF 分析时，需要同时应用初始和边界 VFRC 载荷，需要设置与外界条件相关的环境条件、VFRC 公差以及时间步长等。

本章中给出了两个具有代表性的实例，读者可通过实例的练习加深对 VOF 模型分析的理解。

## 学习要点

- 初始 VFRC 载荷及 VFRC 载荷的范围及偏差
- VOF 模型分析的环境条件及时间步长
- 两个实例分析的详细说明

# 7.1 VFRC 载荷

进行 VOF 分析时要同时应用初始和边界 VFRC 载荷。多数情况下默认值是合适的。

## 7.1.1 初始 VFRC 载荷

按通常的方式对速度和其他自由度设置初始条件。对于初始 VFRC 场，可以把每个单元定义成初始完整、局部完整或者是空的。初始设置局部单元时要当心。每个局部单元必须与至少一个完整单元和一个空单元相邻。在分析过程中，如果一个局部单元临近任何一个完整单元，它将会被重新设置成空单元，因此在自由表面上方至少应包括一层空单元以使表面随时间发展。为了设置初始体积分数场需使用以下方法中的一种：

命令：ICE,ELEM,VFRC,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Volume Fract→Init Loads→On Elements

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Volume Fract→Init Loads→On Elements

默认的体积分数为零，故如果在问题区域流体已经初始化，就必须相应地设定 VFRC 场。

为了设置一个给定几何图形的初始体积分数，需使用以下方法中的一种：

命令：ICVFRC,GEOM,VAL1,VAL2,VAL3,VAL4

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Volume Fract→Init Loads→By Geom

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Volume Frac→Init Loads→By Geom

ICVFRC 会自动计算所有选定单元的体积分数值，这些选定单元或者在给定几何图形内部，或者与之相交。体积分数值为：

1）单元完全在几何图形内部时为 1。

2）单元与几何图形的边界相交时分数等于位于几何图形内部的单元面积。

通常有两种有效的几何形状：圆形（CIRC）和椭圆形（ELPT）。对于一个圆或椭圆，VAL1 和 VAL2 分别为中心的 X 和 Y 坐标。对于一个圆，VAL3 为半径，而不使用 VAL4。对于一个椭圆，VAL3 和 VAL4 分别为 X 半轴和 Y 半轴。

为了显示初始的体积分数载荷，使用以下的操作：

命令：/PICE,VFRC,,KEY

菜单：Utility Menu→PlotCtrls→Symbols

## 7.1.2 建立 VFRC 载荷的边界

按通常的方式对速度和其他自由度设置边界条件。尽管流体区域外部的边界条件最

初没有物理意义，但是如果流体接触到这些边界，这些条件就开始起作用。相应地，在通过流体潜在接触的所有边界上施加所有适当的边界条件。FLOTRAN 使用自然条件来处理不确定的边界。

VFRC 载荷的边界条件由边界 VFRC 值和润湿状况组成。对于边界 VFRC 值，FLOTRAN 仅允许 0（空的）和 1（完整的）值。默认边界 VFRC 值设为 1（完整的）。当边界与表面单元相邻时，FLOTRAN 使用边界 VFRC 值来确定 VOF 重建阶段的垂直表面方向。润湿情况可以确定流体能否被输送到问题区域。0 值表明没有润湿边界，而 1 值表明有润湿边界。默认润湿情况设为 0（没有润湿边界），而相应的边界 VFRC 值必须设为 1 才有意义。在一个没有润湿的边界上，并没有发生流体的输送或者空单元进入问题区域。边界 VFRC 值仅用于帮助确定垂直面方向。

为了设定边界 VFRC 值，可使用以下方法:

命令：SFL,LINE,VFRC,VALI,VALJ,VAL2I,VAL2J
SFE,ELEM,LKEY,VFRC,KVAL,VAL1,VAL2,VAL3,VAL4

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Volume Fract→Bound Loads→On Lines

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Volume Fract→Bound Loads→On Elements

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Volume Fract→Bound Loads→On Lines

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Volume Fract→Bound Loads→On Elements

对于SFL命令，VALI 确定边界 VFRC 值（默认为 1），而 VAL2I 确定润湿状况（默认为非润湿）。如果 Lab = VFRC，一个 VAL2I 设为 1 表明一个润湿边界。对于SFE命令，当 KVAL=0 或 1 时，VALI 确定边界 VFRC 值（默认为 1），而当 KVAL = 2 时，VAL1 确定边界润湿状况（默认为非润湿）。如果 Lab = VFRC 和 KVAL = 2，VAL1 设为 1 表明一个润湿边界。在润湿边界上，流体逆流可以保持相关单元的完整。

## 7.2 输入设置

当进行 VOF 分析时，可以设置与外界条件相关的环境条件，VFRC 公差以及时间步进方法。

当研究表明张力效应时，需对表面张力系数和壁面静态接触角设定合适的值。

### 7.2.1 外界条件

对以下的变量设置流体区域外部的外界节点值：

VX——U 速度

VY——V 速度

VZ——W 速度

TEMP——温度

ENKE——湍流动能

ENDS——湍流耗散率

使用以下方法：

命令：FLDATA36,AMBV, Label,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→VOF Environment→Ambient Condit'n

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→VOF Environment→Ambient Condit'n

当符合一个 Dirichlet 条件的边界节点位于流体区域外部时，这个节点上赋予的外界值可以忽略不计。一旦与之相关的单元变为局部完整或完整的，所指定的 Dirichlet 条件就会起作用。除了压力以外，外界值仅为了后处理而设。压力作为一个实际的边界条件。

不像其他的 FLOTRAN 分析那样，VOF 分析的压力场同时包括动压和静压，并且动压平衡于重力加速度项。例如，在 VOF 分析中，一个考虑重力的平行均匀流动的等压线由具有与重力平衡的梯度的平行线组成，而在其他 FLOTRAN 分析中这些等压线保持恒定。

在 VOF 分析中，出口有一定的压力或者有自然条件。当出口压力确定时，其值不同于其他 FLOTRAN 分析中与静压的偏移（或高程水头）相关的压力值。对于自然边界条件，出口压力会自动调整，在这种情况下如果存在一个稳定解，出口压力就会收敛于修正值。

### 7.2.2 VFRC 公差

理想情况下，VFRC 值为 1 意味着一个完整单元或流体单元，其值为 0 意味着一个空单元或无效单元。然而，实际上由于不同类型的误差累积，0 和 1 的精确值在 VOF 水平对流运算法则中很难维持。因此 FLOTRAN 引用较小的中止值来确定完整的和空的单元。如果 VFRC 值大于或等于 1−VOFU，就认为单元是完整单元，其中 VOFU 为 VOF 水平对流运算法则的上偏差；如果 VFRC 值小于或等于 VOFL，就认为单元为空单元，其中 VOFL 为 VOF 水平对流运算法则的下公差。默认 VOFL 和 VOFU 都设为 $10^{-5}$。

在 FLOTRAN 求解过程中，与一个完整单元相邻的一个空的单元在局部缩放网格中发生了急剧的变化，这使刚度矩阵变得更病态，并严重影响期望解的质量。为了避免出现这种情况，对于那些 VFRC 值小于或等于层流的 LAML 和湍流的 TRBL 的单元，FLOTRAN 引用了另一个公差组合成有限元方程，其中 LAML 和 TRBL 分别为层流和湍流的下偏差。当组合有限元方程时，VFRC 值大于或等于层流的 1 – LAMU 和湍流的 1 – TRBU 的单元则认为是完整单元。这些公差值中的任何一个都可以设置。默认 LAML 和 LAMU 可设为 $10^{-2}$ ，TRBL 和 TRBU 设为 $10^{-1}$。设置任一公差值时使用方法：

命令：FLDATA35,VFTOL,Label,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→VOF Environment→VFRC Tolerance

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→VOF Environment→VFRC Tolerance

### 7.2.3 VOF 时间步

由于 CLEAR-VOF 在时间上是显性的，对于 VOF 水平对流运算法则必须使用一个时间步，这相当于一个小于 1 的 CFL 数。另一方面，由于 FLOTRAN 瞬态求解运算法则在时间上是隐式的，并且时间步大小上没有稳定性限制，因此基于 VOF 约束上选择时间步有时可能会非常受限制。相应地，FLOTRAN 每一求解步采用多重 VOF 水平对流步。VOF 水平对流时间步可设为等于通过指定一个参数划分的求解时间步。如果 VOF 水平对流时间步仍然很大，FLOTRAN 就会把 VOF 时间步自动减半。VOF 时间步自动减少会持续到在 VOF 水平对流计算过程中 VFRC 场的局部不平衡性小于 VOFL 公差。通过消除一些时间步的检测，一个良好的参数估计会使计算效率更高。

设置每一求解时间步的 VOF 水平对流时间步的数目时可使用以下方法：

命令：FLDATA4,TIME,NTVF,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→VOF Environment→Time Stepping

Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→VOF Environment→Time Stepping

对于一个 VOF 分析，密度为常数，因此质量守恒相当于总流体体积（或二维下的面积）守恒。理想情况下，进入问题区域和流出问题区域的体积之差应等于区域内总体积的增加或减少。然而在实际有限元分析中，用 Galerkin 弱结构表示满足连续性。因此，一般每个单元都有一个较小的质量不平衡。局部质量不平衡通常与离散误差相似，而离散误差为 VOF 分析中所引用的局部 VFRC 不平衡性的一个主要来源。尽管与总体积相比，这个不平衡可能会非常小，但是它会随着时间步的增加呈指数积累。因此在每个 VOF 时间步上 FLOTRAN 对 VFRC 值进行了局部调整，通过按比例地增加或减少局部单元的 VFRC 值来保证局部 VFRC 平衡。在 Jobname.PFL 文件中列出了最终的 VFRC 不平衡。

## 7.3 通过障碍物的水流流动初步发展分析

### 7.3.1 问题描述

这个例子描述的是在底部有障碍物的开放水渠中水流的流动。因为自由表面形状对湍流模型影响不大，所以这个例子的计算可以使用标准的 k-ε 湍流模型。在计算模拟开始时，流体就开始充满了水渠。在左边入口处，SFE 和 SFL 命令设置了湿润边界。ANSYS 所分析的几何模型尺寸如图 7-1 所示。

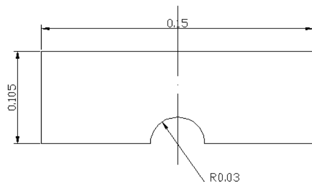



图 7-1 水渠结构示意图

## 7.3.2 前处理

**01 定义工作名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“Flow over a bump”，并将“NEW log and error files？”设置为“Yes”，如图 7-2 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

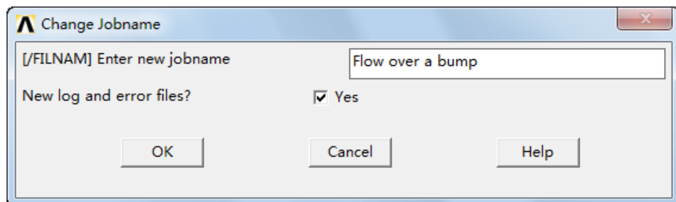



图 7-2 “Change Jobname”对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Initial development of flow over a bump”，如图 7-3 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

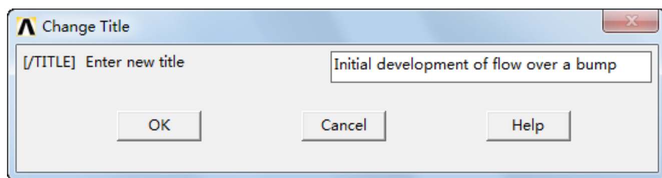



图 7-3 “Change Title”对话框

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 7-4 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/EditDelete，会弹出“Element Types”对话框，如图 7-5 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 7-6 所示。单击“OK”按钮按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

❹单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

**03 建立几何模型。**

❶依次选择 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，会弹出“Scalar Parameters”对话框，如图 7-7 所示。

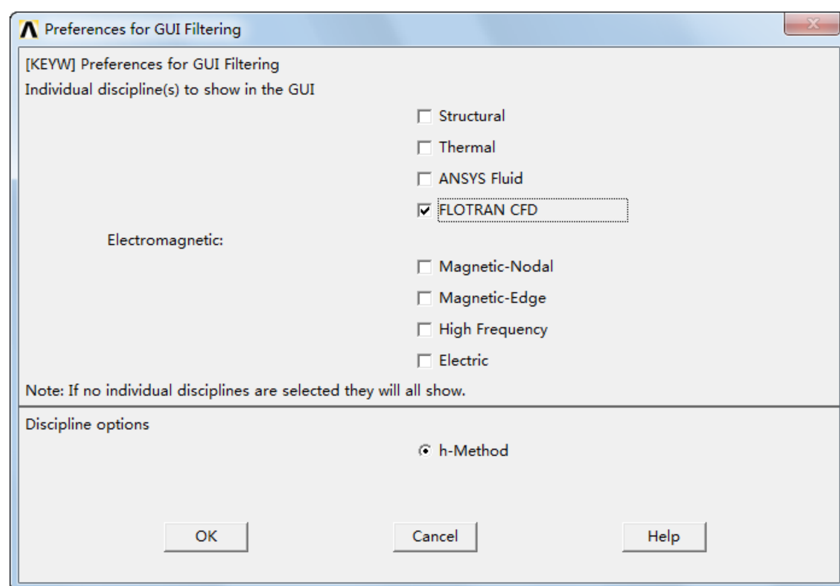



图 7-4 “Preferences for GUI Filtering”对话框

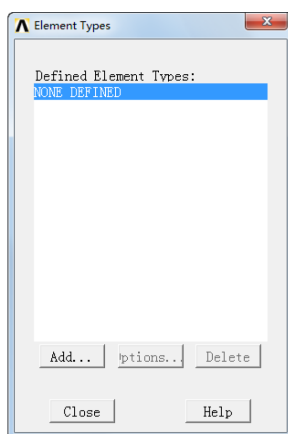



图 7-5 “Element Types”对话框

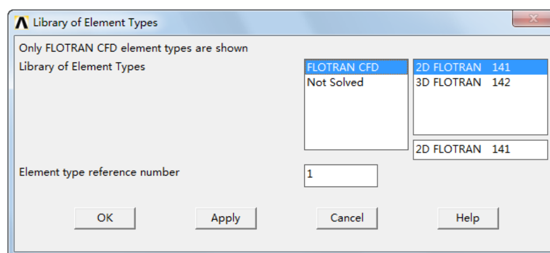



图 7-6 “Library of Element Types”对话框

在“Select”输入框中依次输入：

rho = 1.0；
grav = 9.81；
mu = 1.0e-6；
R = 0.03；
L = 2*R；
H = 0.075；
H0 = R；
Outlen = 5.0*R；
inlen = 5.0*R；
ny1 = 8；
ny2 = 2；
ny3 = 4；
ry2 = 1.0 ；
ry3 = 1.0；
nx1 = 15；
nx2 = 15；
nx3 = 20；
rx1 = 0.5；
rx2 = 1.0；
rx3 = 1.5；
nr1 = 10。



每次输入完之后单击“Apply”按钮，全部输入完成之后单击“Close”按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，会弹“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，如图 7-8 所示。

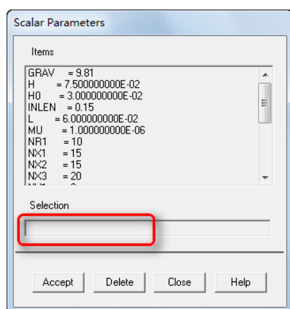
❸在“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框中，在“NPT Keypoint number”输入框输入 1，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入“-inlen，0”。

❹单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，在“NPT Keypoint number”输入框输入 2，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入“-inlen，L”。

❺单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，在“NPT Keypoint number”输入框输入 3，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入“-inlen，H”。

❻单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，在“NPT Keypoint number”输入框输入 4，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入“-inlen，H+H0”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active”选择对话框，用鼠标单击依次单击点 1、2，2、3 和 3、4，单击“OK”按钮关闭该对话框。



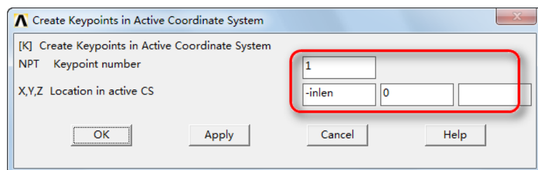




图 7-7 “Scalar Parameters”对话框　图 7-8 “Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，会弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，如图 7-8 所示，在“NPT Keypoint number”输入框输入 5，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入“-L，0”。

❾单击“Apply”按钮会再次弹出 Create Keypoints in Active Coordinate Systems 对话框，在 NPT Keypoint number 输入框输入 6，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入-L，L。

❿单击“Apply”按钮会再次弹出 Create Keypoints in Active Coordinate Systems 对话框，在“NPT Keypoint number”输入框输入 7，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入“-L，H”。

⓫单击“Apply”按钮会再次弹出 Create Keypoints in Active Coordinate Systems 对话框，在“NPT Keypoint number”输入框输入 8，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入“-L，H+H0”。单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓬依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active”选择对话框，依次单击点 5、6，6、7 和 7、8，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓭依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，会弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，如图 7-8 所示，在“NPT Keypoint number”输入框输入 9，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入 L，0。

⓮单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，在“NPT Keypoint number”输入框输入 10，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入 L，L。

⓯单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，在“NPT Keypoint number”输入框输入 11，在“X，Y，Z Location in active CS”

输入框依次输入 L，H。

⑯单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，在“NPT Keypoint number”输入框输入 12，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 L，H+H0。单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑰依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active”选择对话框，用鼠标单击依次单击点 9、10，10、11 和 11、12，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑱依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，会弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，如图 7-8 所示，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 13，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 outlen，0。

⑲单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 14，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 outlen，L。

⑳单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 15，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 outlen，H。

㉑单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 16，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 outlen，H+H0。单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉒依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active”选择对话框，用鼠标单击依次单击点 13、14，14、15 和 15、16。

㉓单击“Apply”按钮，会再次弹出“Lines in Active”选择对话框，用鼠标单击依次单击点 1、5，2、6，3、7，4、8，9、13，10、14，11、15，12、16，6、10，7、11 和 8、12。

㉔依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，会弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，如图 7-8 所示，在“NPT Keypoint number”输入框输入 17，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 R，0。

㉕单击“Apply”按钮会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate Systems”对话框，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 18，在 X，Y，Z　Location in active CS 输入框依次输入 0，0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉖依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→By Cent&Radius，会弹出“Arc by Center & R…”选择对话框，用鼠标选择关键点 18，在选择对话框的输入框中输入 R。

㉗单击“OK”按钮会弹出“Arc by Center & Radius”对话框，如图 7-9 所示，在“ARC Arc length in degrees”输入框中输入 180，在“NSEG　Number of lines in arc”输入框中

输入 4，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉘依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，选择“KP Keypoints numbers”，使其状态从“Off”变为“On”，选择“LINE Line numbers”，使其状态从“Off”变为“On”，选择“AREA Area numbers”，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，如图 7-10 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

㉙依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Lines，会弹出“Add Lines”选择对话框，用鼠标选择线段 25 和 26，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉚依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active”选择对话框，用鼠标单击依次单击点 19、9，20、10，22、6 和 23、5，单击“OK”按钮关闭该对话框。



在选择点 19 时，会弹出“Multiple_Entities”对话框，单击“Next”按钮，使“Picked Keypoints is 17”变为“Picked Keypoints is 19”，然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

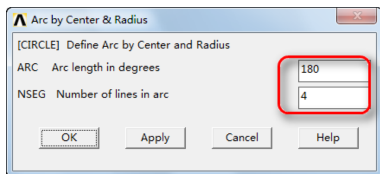



图 7-9 “Arc by Center & Radius”对话框

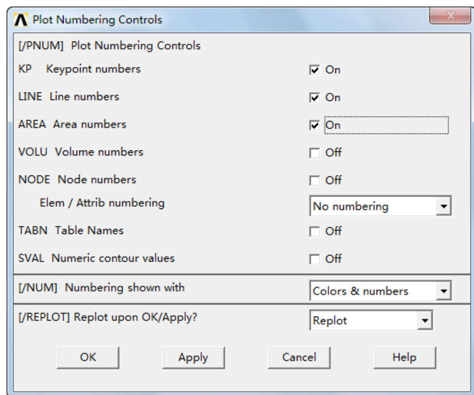



图 7-10 “Plot Numbering Controls”对话框

㉛依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗口将变成白色。依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，窗口将显示所生成的线段模型，生成的线段模型如图 7-11 所示。

㉜依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→By Lines，会弹出“Create Area by Lines”选择对话框，用鼠标依次选择线段 L1、L13、L4、L14。

㉝单击“Apply”按钮,会再次弹出“Create Area by Lines”选择对话框，用鼠标依次单击以下 10 组线段：

L2、L14、L5、L15；

L3、L15、L6、L16；

L7、L17、L10、L18；
L8、L18、L11、L19；
L9、L19、L12、L20；
L5、L21、L8、L22；
L6、L22、L9、L23；
L24、L26、L7、L28；
L25、L28、L21、L29；
L4、L30、L27、L29。

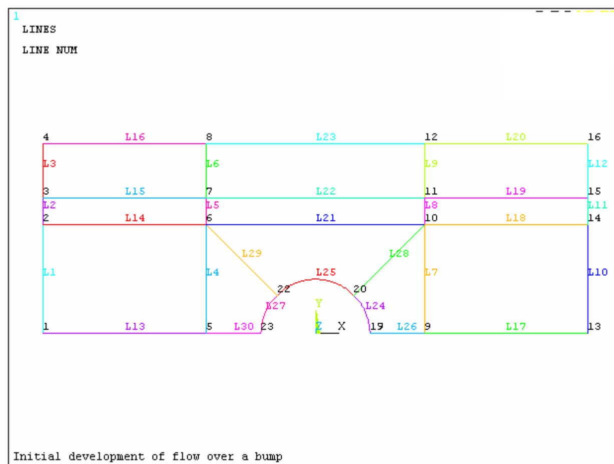



图 7-11 生成的线段模型



每次输入完一组单击一次“Apply”按钮，最后一组输入完成之后单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸❹依次选择 Utility Menu→Plot→Areas，窗口将显示所生成的几何模型，生成的几何模型如图 7-12 所示。

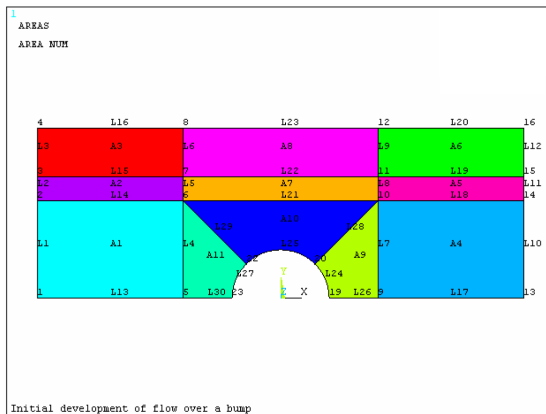



图 7-12 生成的几何模型

❸❺单击“ANSYS”工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**04** 划分网格。

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-13 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L1、L4，单击“OK”按钮关闭对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-14 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-15 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 ny1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-13 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L2、L5、L8、L11，单击“OK”按钮关闭对话框。

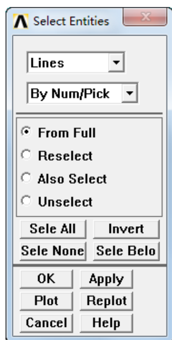



图 7-13 “Select Entities”对话框

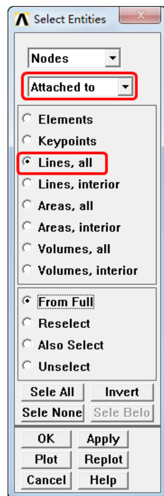



图 7-14 “Select Entities”对话框

❼依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-14 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-15 所示，在“NDIV No. of element

divisions”输入框输入 ny2，在“SPACE　Space ratio”输入框中输入 ry2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-13 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L3、L6、L9、L12，单击“OK”按钮关闭对话框。

❿依次选择 Utility Menu→Select→Entities 命令，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-14 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-15 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 ny3，在“SPACE　Space ratio”输入框中输入 ry3，单击“OK”按钮关闭该对话框。

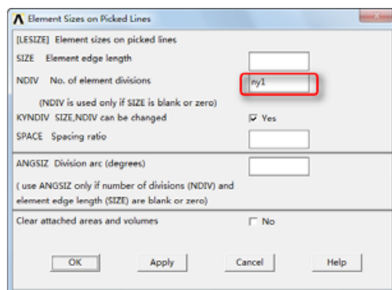



图 7-15 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

⓬依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-13 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”选择对话框，选择线段 L13、L14、L15、L16，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓭依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-14 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓮依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-15 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 nx1，在“SPACE　Space ratio”输入框中输入 rx1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓯依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-13 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”选择对

话框，选择线段 L21、L22、L23，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑯依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-14 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑰依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-15 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 nx2，在“SPACE　Space ratio”输入框中输入 1/rx2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑱依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-13 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”选择对话框，选择线段 L25，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑲依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-14 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-15 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 nx2，在“SPACE　Space ratio”输入框中输入 rx2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉑依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-13 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”选择对话框，选择线段 L17、L18、L19、L20，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉒依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-14 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉓依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”选择对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-15 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 nx3，在“SPACE　Space ratio”输入框中输入 rx3，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉔依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-13 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”选择对话框，选择线段 L27，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉕依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第

一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-14 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉖依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-15 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 ny1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉗依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-13 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”选择对话框，选择线段 L26、L28、L29、L30，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉘依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-14 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉙依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-15 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 nr1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉚依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-13 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”选择对话框，选择线段 L24、L7、L10，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉛依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-14 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉜依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-15 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 nx2，在“SPACE Space ratio”输入框中输入 1.5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉝依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided，会弹出“Mesh Areas”对话框，单击“Pick All”按钮，划分的网格模型如图 7-16 所示。

㉞单击“ANSYS”工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**05 定义边界条件。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框

中选择“From Full”，如图 7-17 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”选择对话框，选择线段 L1、L2，单击“OK”按钮关闭对话框。

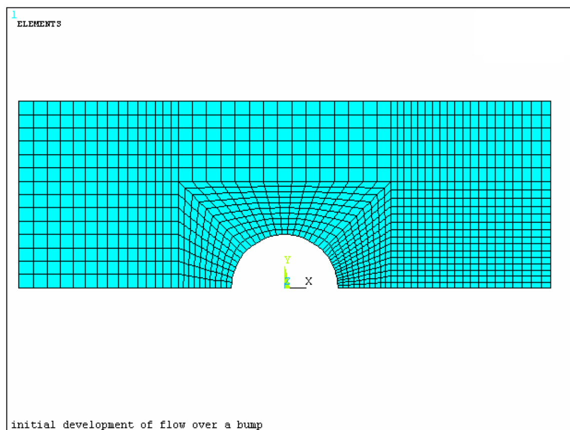



图 7-16 划分网格后的模型

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-18 所示。单击“OK”按钮关闭该对话框。




图 7-17 “Select Entities”对话框

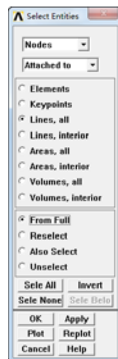



图 7-18 “Select Entities”对话框

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 7-19 所示。

❻“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VX　Load value”输入框中输入 0.32，在“VY　a Load value”输入框中输入 0，如图 7-19 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 7-20 所示。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入-inlen，单击“OK”按钮关闭对话框。

❽依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 7-20 所示。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择 By Location，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，在第四个单选框中选择“Reselect”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❾依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 7-19 所示。

❿“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VX Load value”输入框中输入 0.001，单击“OK”按钮关闭该对话框。

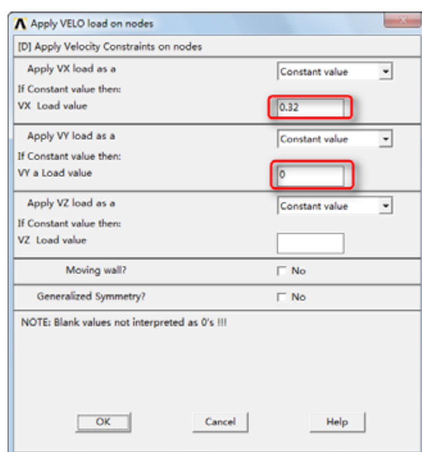



图 7-19 “Apply VELO load on Nodes”对话框

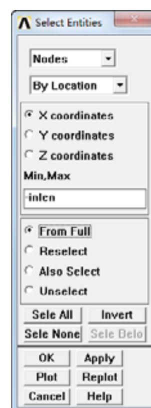



图 7-20 “Select Entities”对话框

⓫依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Volume Fract→Bound Loads→On Lines，会弹出“Apply VFRC load on lines”对话框，用鼠标选择线段 1 和 2。

⓬单击“OK”按钮会弹出“Apply VFRC load on lines”对话框，如图 7-21 所示，在 Boundary Value 输入框中输入 1，在“Wetting Status value”输入框输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

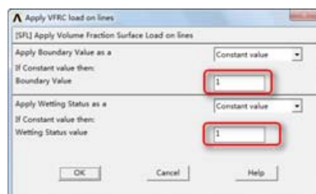


图 7-21 “Apply VFRC load on lines”对话框

⓭依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-17 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L13、L30、L27、L25、L24、L26、L17，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓮依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-18 所示。单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓯依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 7-19 所示。

⓰在“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VX　Load value”输入框中输入 0，在“VY a Load value”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框，则加载后的几何模型如图 7-22 所示。

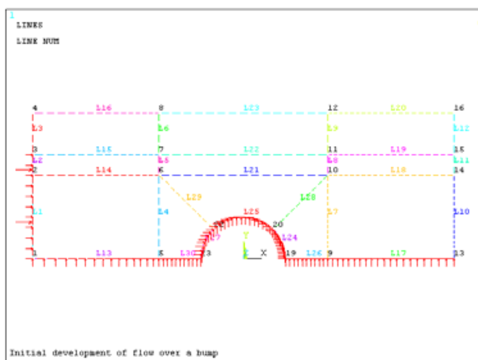



图 7-22　加载后的几何模型

## 7.3.3　求解

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Gravity，会弹出“Gravity Specification”对话框，如图 7-23 所示，在“ACELY　Accel in Y direction”输入框中输入 grav，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 7-24 所示，在“TRAN　Steady state or transient？”选择列表中选择“Transient”，在“TURB Laminar or turbulent？”选择列表中选择“Turbulent”，单击“VOF　Activate VOF advection？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Time Step Controls”对话框，如图 7-25 所示，在“STEP　Select time step control”后的选择列表选择“User defined”。

❹单击“OK”按钮会弹出“Transient Controls”对话框，如图 7-26 所示，在“STEP　User-defined time step”输入框输入 1e-2，在“NUMB　Number of time steps”输入框输入 50，在“GLOB　Global iter per time step”输入框输入 3，在“PRES　Pressure”输入框输入 1e-6，在“STEP，APPE Number of time steps”输入框输入 0.1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

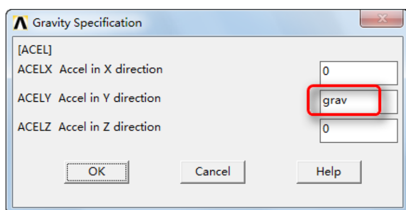



图 7-23 “Gravity Specification”对话框

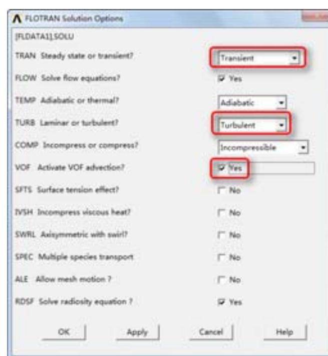



图 7-24 “FLOTRAN Solution Options”对话框

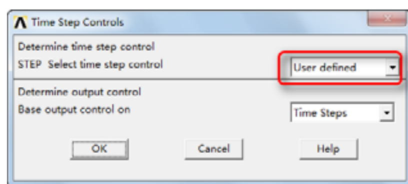



图 7-25 “Time Step Controls”对话框

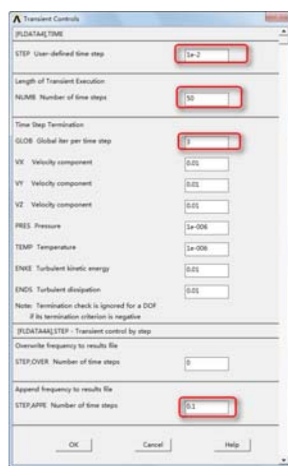


图 7-26 “Transient Controls”对话框




“STEP，APPE Number of time steps”输入框在对话框下面，需要拖动对话框右边的拉条才能看到。

❺依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Advection，会弹出“Advection Option”对话框，如图 7-27 所示，确认“MOME Momentum equations”后要选择“SUPG”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation，会弹出“DOF Relaxation”对话框，如图 7-28 所示，在“PRES Pressure relaxation”输入框输入 1，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 7-29 所示，采用默认设置。

❽单击“OK”按钮会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 7-30 所示，在“Density property type CONSTANT Constant value”输入框中输入 rho，在“Viscosity property type CONSTANT Constant value”输入框中输入 mu，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

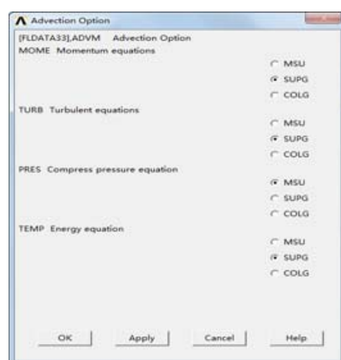



图 7-27 “Advection Option”对话框

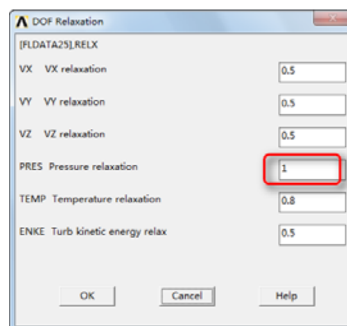



图 7-28 “DOF Relaxation”对话框

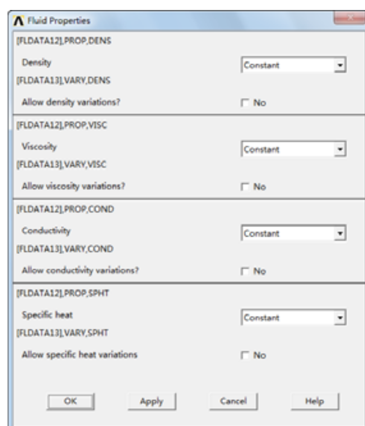






图 7-29 “Fluid Properties”对话框　　　图 7-30 “CFD Flow Properties”对话框

❾依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❿依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 7-31 所示。

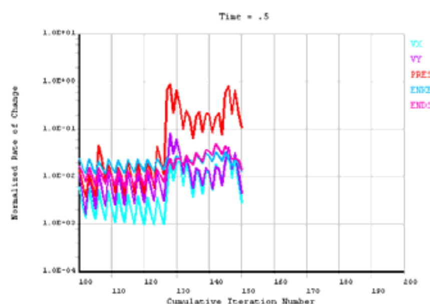



图 7-31 迭代曲线




有些多核处理器的计算机在计算时出现如图 7-32 所示的错误对话框，则需

要将并行计算关闭，按图 7-33 所示在“Mechanical APDL Product Launcher”对话框中将处理器的数量设为 1。

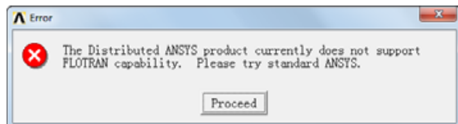



图 7-32 错误对话框

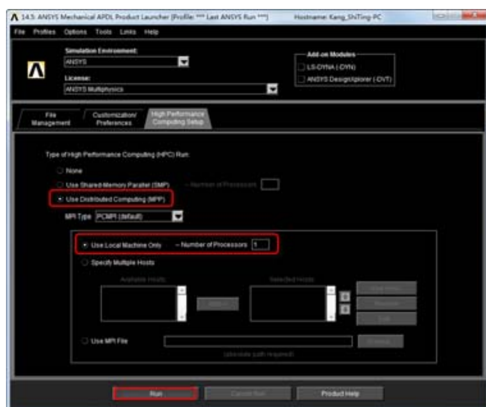


图 7-33 “Mechanical APDL Product Launcher”对话框

## 7.3.4 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

❷依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 7-34 所示。

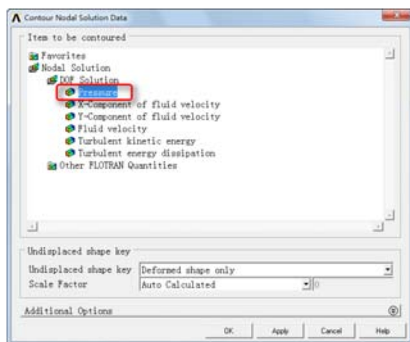



图 7-34 “Contour Nodal Solution Data”对话框

❸在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Pressure，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-35 所示的流体压力场分布等值线图。

❹重复第❷步操作。在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Fluid velocity，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-36 所示的流体速度场分布

等值线图。

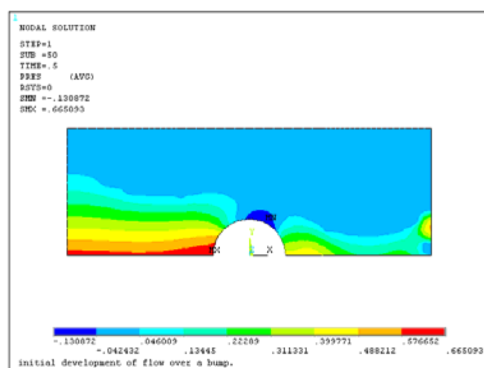



图 7-35 流体压力场分布等值线图

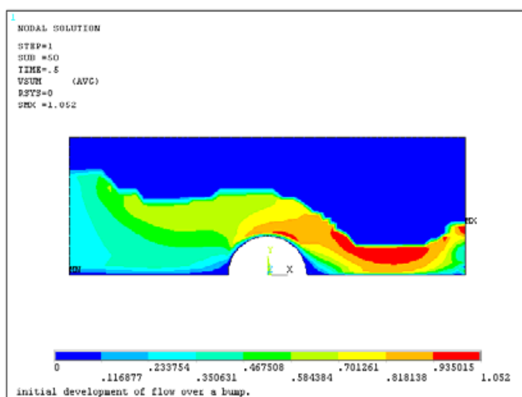



图 7-36 流体速度场分布等值线图

❺重复第❷步操作。在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→X-Component of fluid velocity，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-37 所示的流体轴向速度场分布等值线图。

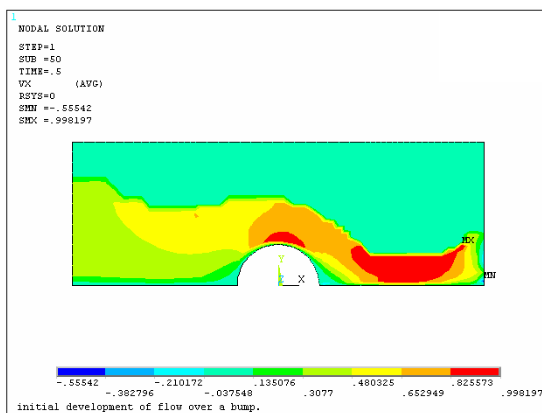



图 7-37 流体轴向速度场分布等值线图

❻依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Vector→Predefined，会弹出“Vector Plot of Predefined Vectors”对话框，如图 7-38 所示。在对话框中选择 DOF Solution→Velocity V，单击“OK”按钮，会得到流场的速度分布图，如图 7-39 所示。

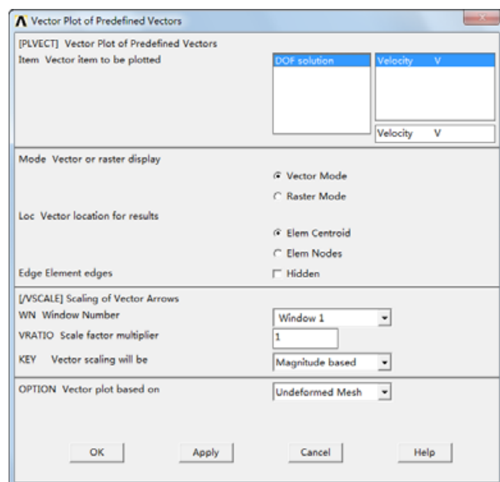



图 7-38 “Vector Plot of Predefined Vectors”对话框

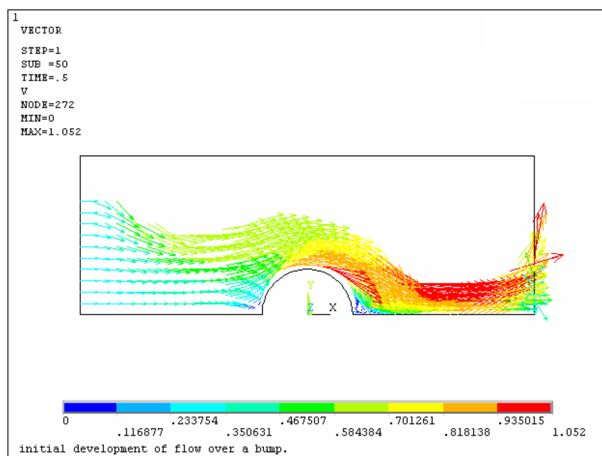



图 7-39 流场的速度分布图

### 7.3.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

## 7.4 大坝 VOF 分析

### 7.4.1 问题描述

在这个例子中，两个垂直的坝体将水固定在一个矩形区域内。当将右边的坝体损坏

或打开之后，矩形区域里的水会流出，ICE 命令可以设置区域的初始容积率。ANSYS 所分析的几何模型尺寸如图 7-40 所示。




图 7-40 矩形区域结构示意图

## 7.4.2 前处理

**01 定义工作名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名 Dam，并将“NEW log and error files”设置为“Yes”，如图 7-41 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

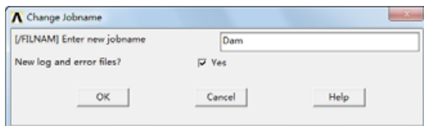



图 7-41 “Change Jobname”对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“VOF Analysis of a Dam”，如图 7-42 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

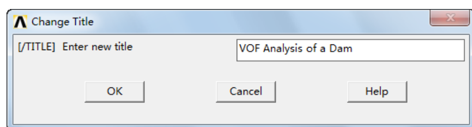



图 7-42 “Change Title”对话框

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 7-43 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit Delete，会弹出“Element Types”对话框，如图 7-44 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 7-45 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

❹单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

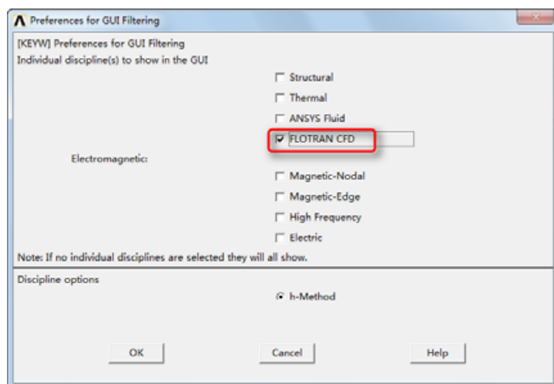



图 7-43 “Preferences for GUI Filtering”对话框

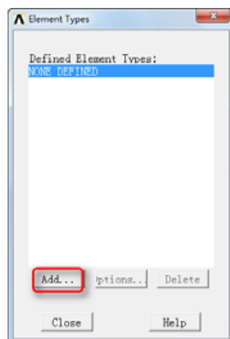



图 7-44 “Element Types”对话框

**03** 建立几何模型。

❶依次选择 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，会弹出“Scalar Parameters”对话框，如图 7-46 所示。在 Select 输入框中依次输入：

LX = 5.0；

LY = 2.5；

DELX = 0.2；

DELY = 0.05；

grav = 9.81。

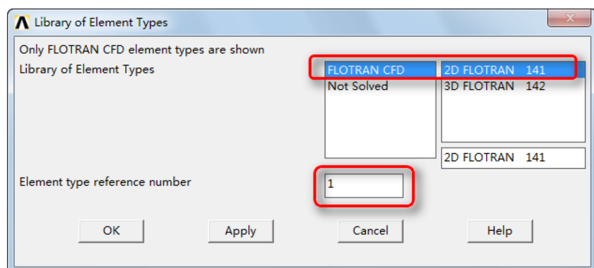



图 7-45 “Element type reference number”对话框

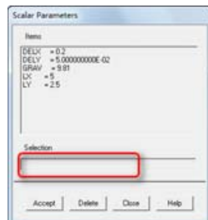


图 7-46 “Scalar Parameters”对话框




每次输入完之后单击“Apply”按钮，全部输入完成之后单击“Close”按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 7-47 所示，在“X1，X2 X-coordinates”输入框中依次输入 0，LX，在“Y1，Y2 Y-coordinates”输入框中依次输入 0，LY。

❸依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，选择“Line Line numbers”，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，如图 7-48 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❹依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗

口将变成白色。依次选择 Utility Menu→Plot→Areas 将显示所生成的几何模型，生成的几何模型如图 7-49 所示。

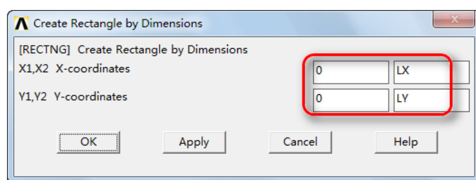



图 7-47 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

❺单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”保存数据。

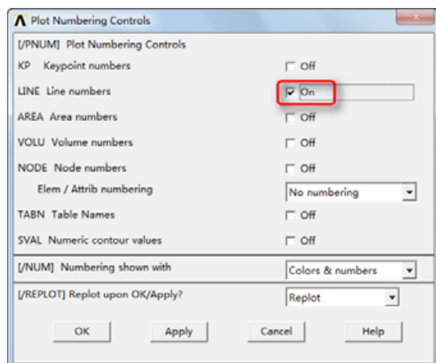



图 7-48 “Plot Numbering Controls”对话框

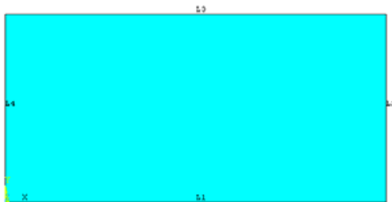


图 7-49 生成的几何模型

**04** 划分网格。

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-50 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”选择对话框，选择线段 L2、L4，单击“OK”按钮关闭对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-51 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-52 所示，在“SIZE　Element edge length”输入框输入 DELY，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-50 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”选择对话框，选择线段 L1、L3，单击“OK”按钮关闭对话框。

❼依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-51 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

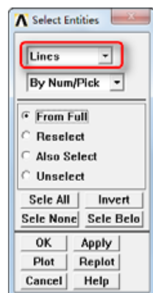



图 7-50 “Select Entities”对话框

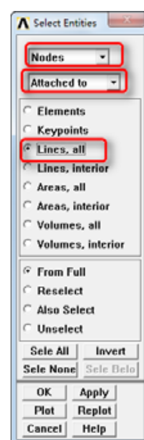



图 7-51 “Select Entities”对话框

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-52 所示，在 SIZE Element edge length 输入框输入 DELX，单击“OK”按钮关闭该对话框。

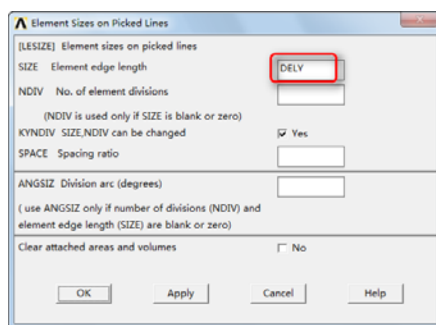



图 7-52 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

❾依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided，会弹出“Mesh Areas”对话框，单击“Pick All”按钮，划分的网格模型如图 7-53 所示。

❿单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**05 定义边界条件。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 7-54 所示。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，

在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭对话框。

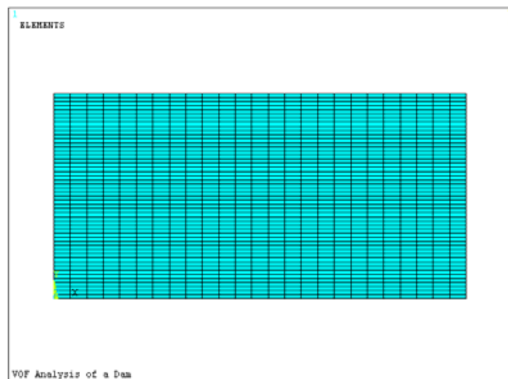



图 7-53 划分网格后的模型

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 7-54 所示。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，在第四个单选框中选择“Also Select”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 7-55 所示。

❻“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VX Load value”输入框中输入 0，在“VY a Load value”输入框中输入 0，如图 7-55 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 7-54 所示。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，1，单击“OK”按钮关闭对话框。

❽依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 7-54 所示。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，2，在第四个单选框中选择“Reselect”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❾依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 7-56 所示。在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Nodes，all”，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭对话框。

❿依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Volume Fract→Init Loads→On Elements，会弹出“Apply VFRC on Elems”选择对话框，单击“Pick All”按钮会弹出“Initialize VFRC on Elems”对话框，如图 7-57 所示，在“VFRC”

输入框中输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

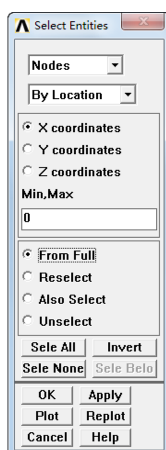



图 7-54 “Select Entities”对话框

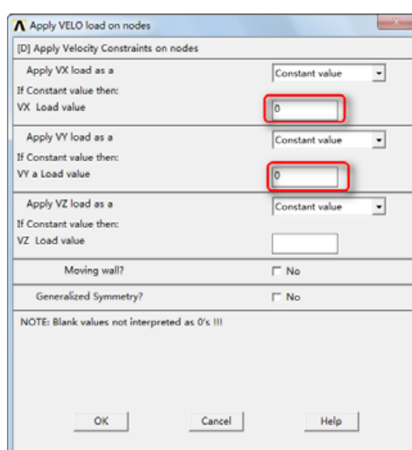



图 7-55 “Apply VELO load on Nodes”对话框

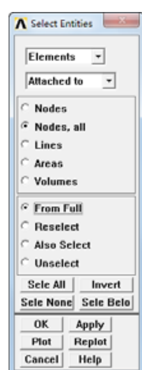



图 7-56 “Select Entities”对话框

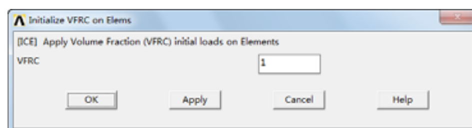



图 7-57 “Initialize VFRC on Elems”对话框

⓫依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Initial Condit'n→Define，会弹出“Define Initial C…”对话框，单击“Pick All”按钮会弹出“Define Initial Conditions”对话框，如图 7-58 所示，在“Lab DOF to be specified”选择列表中选择 VX，在“VALUE Initial value of DOF”输入框中输入 0。

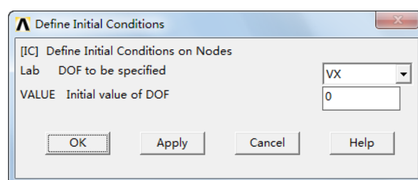



图 7-58 “Define Initial Conditions”对话框

⓬单击“Apply”按钮会再弹出“Define Initial C…”对话框，单击“Pick All”按钮会弹出“Define Initial Conditions”对话框，在“Lab DOF to be specified”选择列表中选择 VY，在“VALUE Initial value of DOF”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭该对

话框。加载后的几何模型如图 7-59 所示。

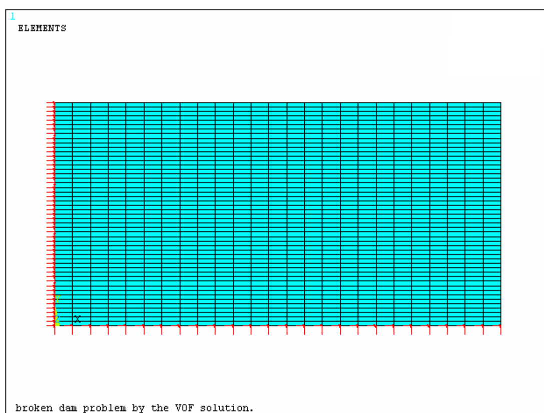



图 7-59 加载后的几何模型

⓭单击“ANSYS”工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

## 7.4.3 求解

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Gravity，会弹出“Gravity Specification”对话框，如图 7-60 所示，在“ACELY Accel in Y direction”输入框中输入 grav，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 7-61 所示，采用默认设置。

❸单击“OK”按钮会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 7-60 所示，在“Density property type CONSTANT Constant value”输入框中输入 1e3，在“Viscosity property type CONSTANT Constant value”输入框中输入 1e-3，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

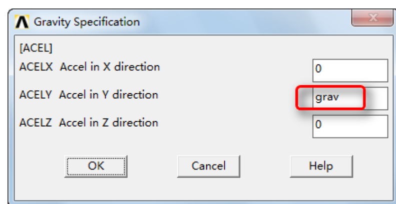



图 7-60 “Gravity Specification”对话框

❹依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 7-63 所示，在“TRAN Steady state or transient？”选择列表中选择“Transient”，单击“FLOW Solve flow equation？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，在“TURB Laminar or turbulent？”选择列表中选择“Laminar”，单击“VOF Activate VOF advection？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Time

Step Controls”对话框，如图 7-64 所示，在“STEP　Select time step control”后的选择列表选择“User defined”。

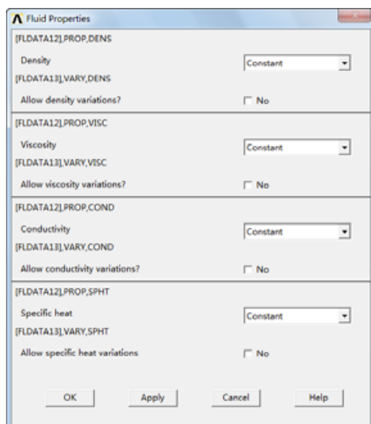



图 7-61 “Fluid Properties”对话框

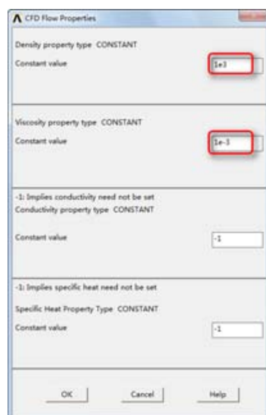



图 7-62 “CFD Flow Properties”对话框

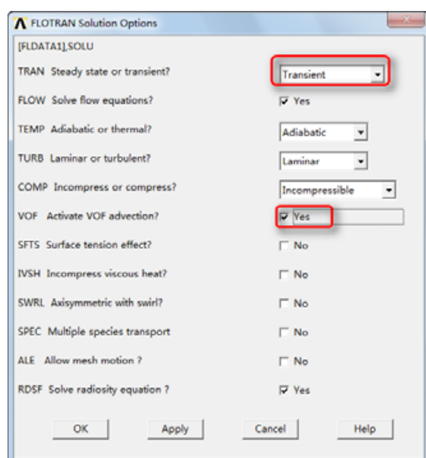



图 7-63 “FLOTRAN Solution Options”对话框

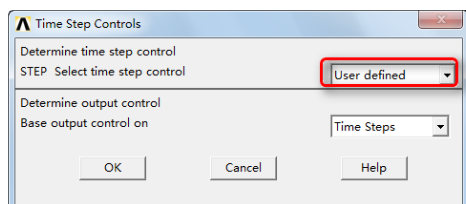



图 7-64 “Time Step Controls”对话框

❻单击“OK”按钮会弹出“Transient Controls”对话框，如图 7-65 所示，在“STEP　User-defined time step”输入框输入 0.01，在“NUMB　Number of time steps”输入框输入 70，在“GLOB　Global iter per time step”输入框输入 5，在“STEP，APPE　Number of time steps”输入框输入 0.1，单击“OK”按钮关闭该对话框。




“STEP，APPE　Number of time steps”输入框在对话框下面，需要拖动对话框右边的拉条才能看到。

❼依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Advection，会弹出“Advection Option”对话框，如图 7-66 所示，确认“MOME　Momentum equations”后要选择“SUPG”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation，会弹出“DOF Relaxation”对话框，如图 7-67 所示，在“VX　VX relaxation”

输入框输入 0.5，在“VY　VY relaxation”输入框输入 0.5，在“PRES　Pressure relaxation”输入框输入 1，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

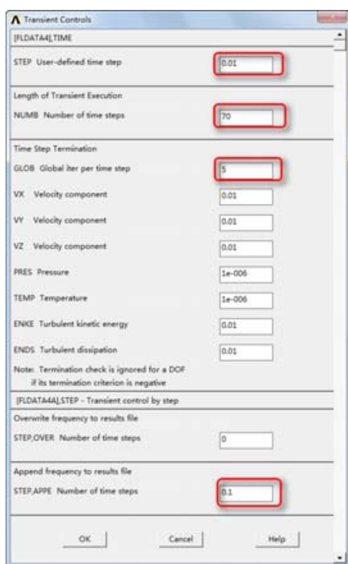



图 7-65 “Transient Controls”对话框

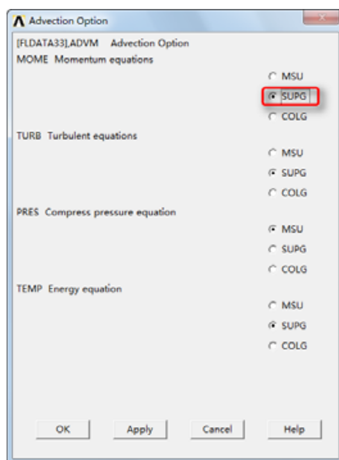



图 7-66 “Advection Option”对话框

❿依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 7-68 所示。

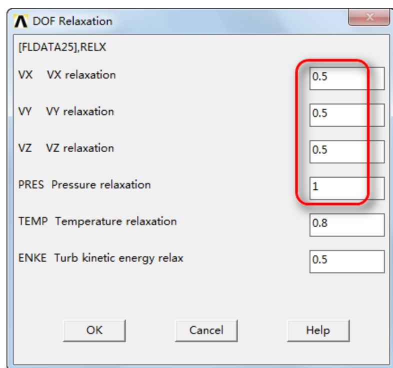



图 7-67 “DOF Relaxation”对话框

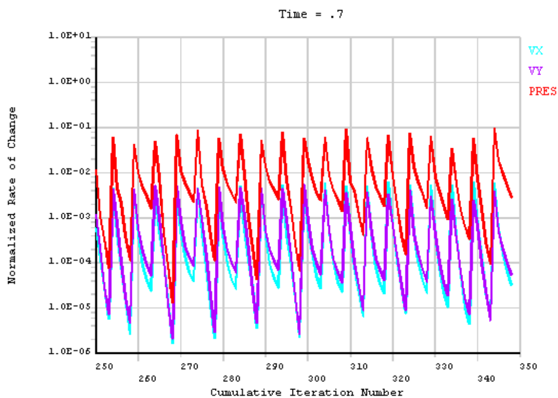



图 7-68 迭代曲线

## 7.4.4 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

❷依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 7-69 所示。

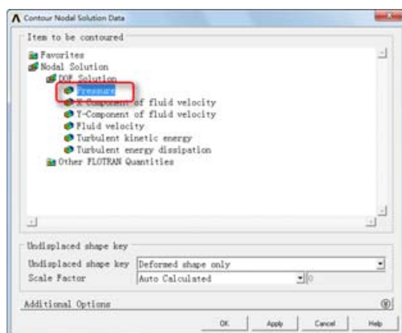



图 7-69 “Contour Nodal Solution Data”对话框

❸在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Pressure，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-70 所示的流体压力场分布等值线图。

❹重复第❷步操作。在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Fluid velocity，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-71 所示的流体速度场分布等值线图。

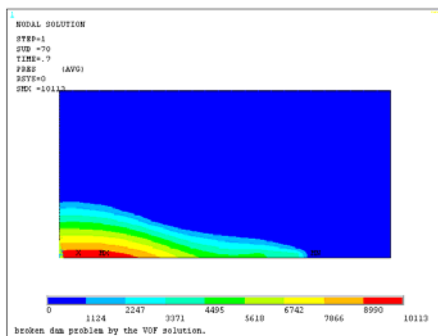



图 7-70 流体压力场分布等值线图

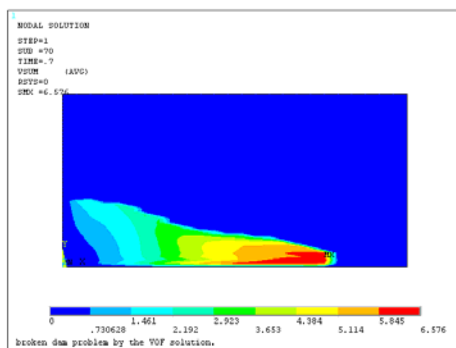



图 7-71 流体速度场分布等值线图

❺重复第❷步操作。在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→X-Component of fluid velocity，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-72 所示的流体横向速度场分布等值线图。

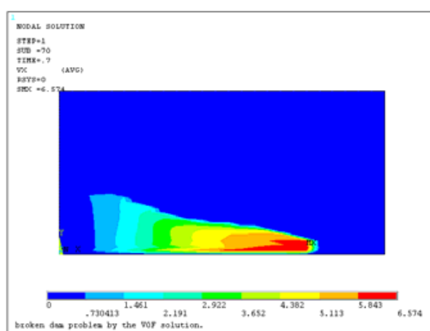



图 7-72 流体横向速度场分布等值线图

❻重复第❷步操作。在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Y-Component of fluid velocity，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-73 所示的流体纵向速度场分布等值线图。

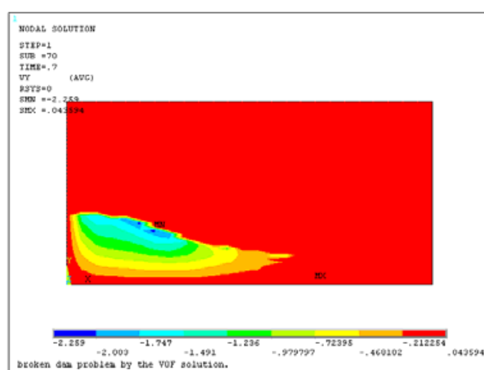



图 7-73 流体纵向速度场分布等值线图

❼依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Vector Plot→Predefined，会弹出“Vector Plot of  Predefined Vectors”对话框，如图 7-74 所示。在对话框中选择“DOF Solution→Velocity V”，单击“OK”按钮，会得到流场的速度分布图，如图 7-75 所示。

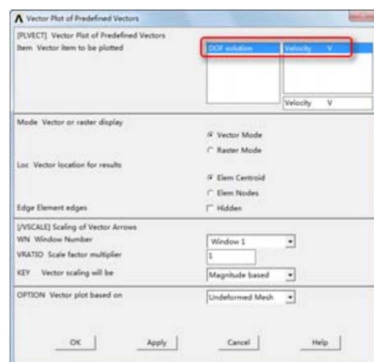



图 7-74 “Vector Plot of  Predefined Vectors”对话框

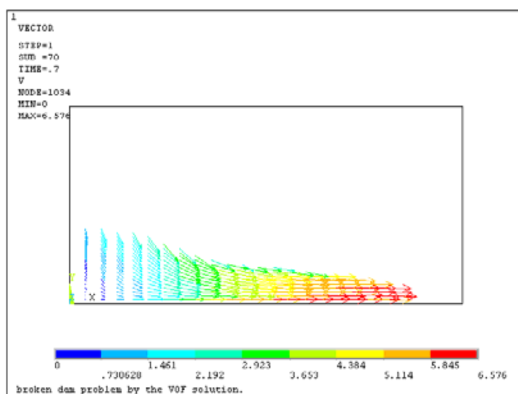



图 7-75 流场的速度分布图

### 7.4.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

## 7.5 振荡液滴的 VOF 模型分析

### 7.5.1 问题描述

这个例子分析的是液滴在动态气体中的振荡问题。对于较小的振幅，角频率

$$\omega^2=\left[8-(5/Re)^2\right]\frac{\sigma}{\rho R_{\mathrm{F}}^3}$$

式中，$\rho$ 表示密度；$\sigma$ 表示表面张力系数；$R_{\mathrm{F}}$ 表示在平衡状态下液滴的半径。

这里的雷诺数 $Re$ 可由以下公式得到

$$Re=\frac{\sqrt{\rho\sigma R_{\mathrm{F}}}}{\mu}$$

由于粘度原因振荡是有阻尼的，液滴保持球状所需的液面压力为

$$P=\frac{2\sigma}{R_{\mathrm{F}}}$$

分析的液滴最初是椭圆形的，长半轴和短半轴分别为 24.69mm 和 18mm，相当于最后的半径是 20mm。时间步长 $\Delta t=2\times10^{-4}$ms。材料参数见表 7-1。

**表 7-1 材料参数**

| 粘度 $\mu$/[mg/（μm·ms）] | 密度 $\rho$/（mg/μm$^3$） | 表面张力 $\sigma$/（mg/ms$^2$） |
|---|---|---|
| $1\times10^{-6}$ | $1\times10^{-9}$ | 0.073 |

## 7.5.2 前处理

**01 定义工作名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“Oscillating drop”，并将“NEW log and error files？”设置为“Yes”，如图 7-76 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

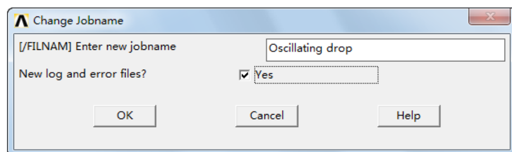



图 7-76 “Change Jobname”对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Oscillating axisymmetric drop problem by the VOF/CSF solution”，如图 7-77 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

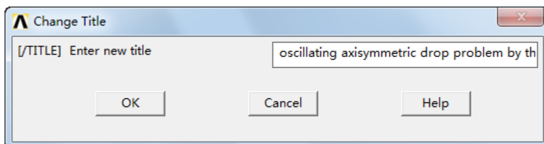



图 7-77 “Change Title”对话框

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 7-78 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/EditDelete 命令，会弹出“Element Types”对话框，如图 7-79 所示。

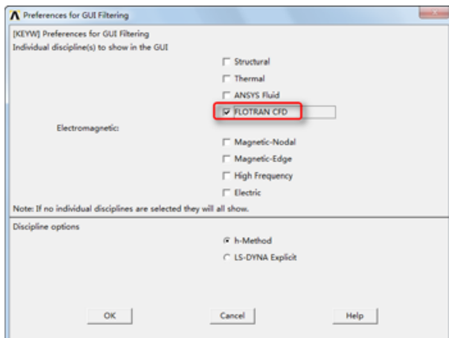


图 7-78 “Preferences for GUI Filtering”对话框

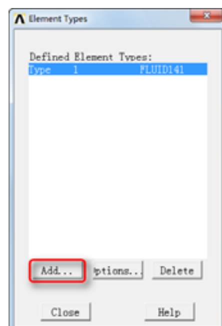


图 7-79 “Element Types”对话框

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和 2D FLOTRAN

141，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 7-80 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

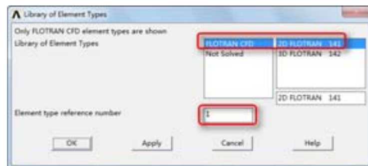


图 7-80 “Library of Element Types”对话框

❹单击“Element Types”对话框中的“Options”按钮，会弹出“FLUID141 element type options”对话框，如图 7-81 所示，在“Element coordinate system K3”选择列表中选择“Axisymm about Y”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

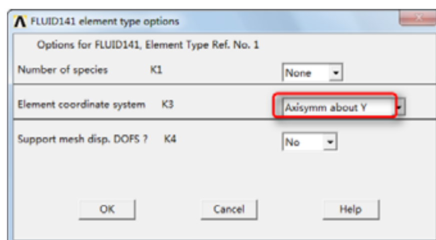



图 7-81 “FLUID141 element type options”对话框

03 建立几何模型。

❶依次选择 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，会弹出“Scalar Parameters”对话框，如图 7-82 所示。在“Select”输入框中依次输入：

LX = 30；

LY = 30；

RadF = 20；

aRad = 18；

bRad = RadF**3/aRad**2；

DELX = 0.1*RadF；

DELY = 0.1*RadF；

DELT = 2.0e-4；

APPT = DELT*5；

NDT = 1000；

Sigm = 0.073；

rho = 1.0e-9；

mu = 1.0e-6；

pexact=2*Sigm/RadF；


每次输入完之后单击“Apply”按钮，全部输入完成之后单击“Close”按钮关闭

该对话框。

❷依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 7-83 所示，在“X1，X2 X-coordinates”输入框中依次输入 0，LX，在“Y1，Y2 Y-coordinates”输入框中依次输入-LY，LY。

❸依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，选择“Line Line numbers”，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，如图 7-84 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

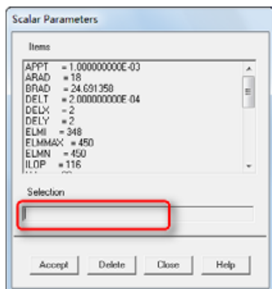


图 7-82 “Scalar Parameters”对话框

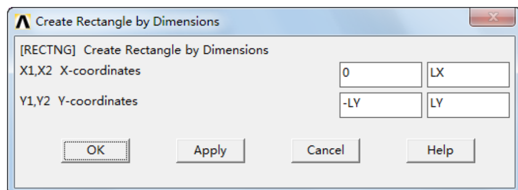


图 7-83 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

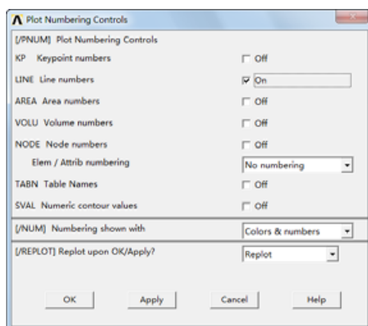


图 7-84 “Plot Numbering Controls”对话框

❹依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗口将变成白色。依次选择 Utility Menu→Plot→Areas 将显示所生成的几何模型，生成的几何模型如图 7-85 所示。

❺单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**04 划分网格。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-86 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L2、L4，单击“OK”按钮关闭对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第

一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-87 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

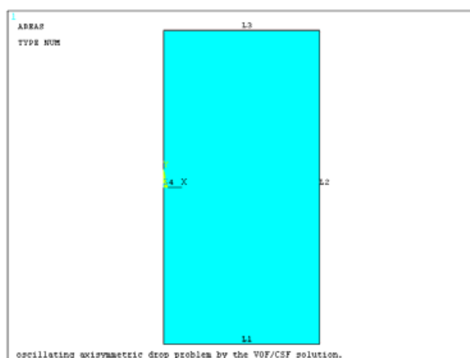


图 7-85 生成的几何模型

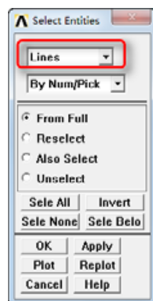



图 7-86 “Select Entities”对话框

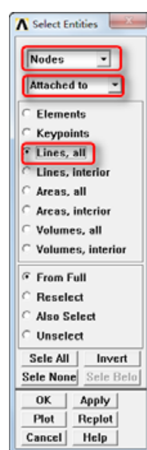



图 7-87 “Select Entities”对话框

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-88 所示，在“SIZE Element edge length”输入框输入 DELY，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 7-86 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”选择对话框，选择线段 L1、L3，单击“OK”按钮关闭对话框。

❼依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 7-87 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出

“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 7-88 所示，在“SIZE　Element edge length”输入框输入 DELX，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided，会弹出“Mesh Areas”对话框，单击“Pick All”按钮，划分的网格模型如图 7-89 所示。

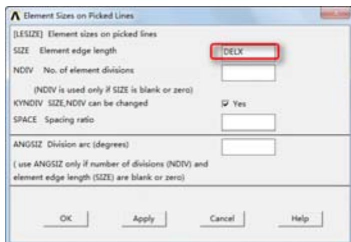



图 7-88 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

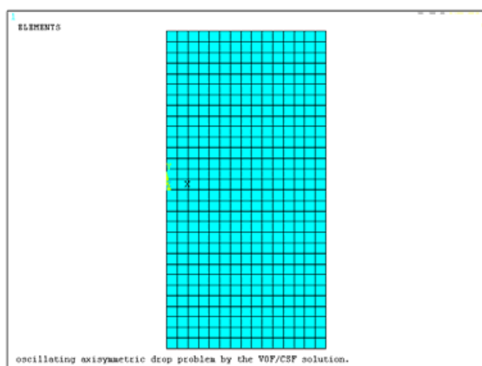



图 7-89 划分网格后的模型

❿单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**05 定义边界条件。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 7-90 所示。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭对话框。

❹依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 7-91 所示。

❺“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VX　Load value”输入框中输入 0，如图 7-91 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Volume Fract→Init Loads→By Geom→Elliptic，会弹出“Initialize VFRC by Geom”对话

框，如图 7-92 所示，在“x-origin”输入框输入 0，在“y-origin”输入框输入 0，在“x-Radius”输入框输入 aRad，在“y-Radius”输入框输入 bRad，单击“OK”按钮关闭该对话框。

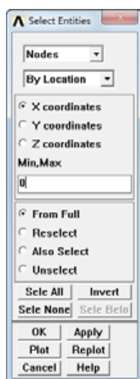


图 7-90 “Select Entities”对话框

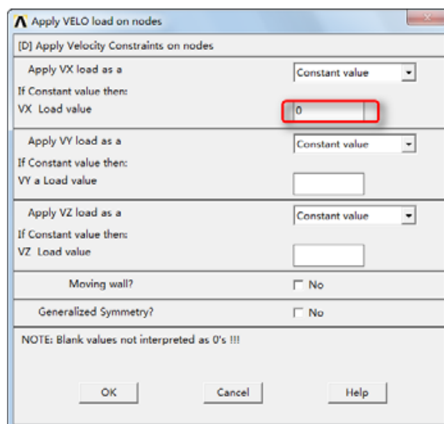


图 7-91 “Apply VELO load on Nodes”对话框

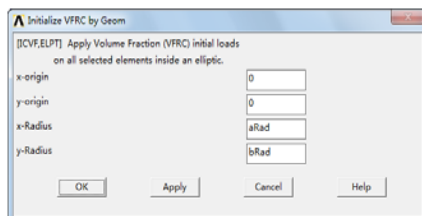


图 7-92 “Initialize VFRC by Geom”对话框

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Initial Condit'n→Define，会弹出 Define Initial C…对话框，单击“Pick All”按钮会弹出“Define Initial Conditions”对话框，如图 7-93 所示，在“Lab DOF to be specified”选择列表中选择 VX，在“VALUE Initial value of DOF”输入框中输入 0。

❽单击“Apply”按钮会再弹出 Define Initial C…对话框，单击“Pick All”按钮会弹出“Define Initial Conditions”对话框，在“Lab DOF to be specified”选择列表中选择 VY，在“VALUE Initial value of DOF”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。加载后的几何模型如图 7-94 所示。

❾单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

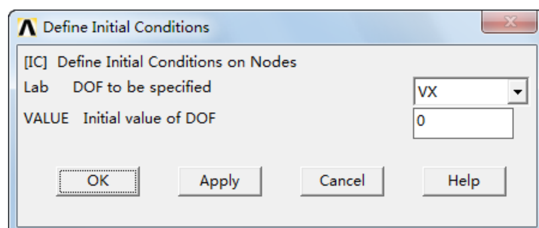


图 7-93 “Define Initial Conditions”对话框

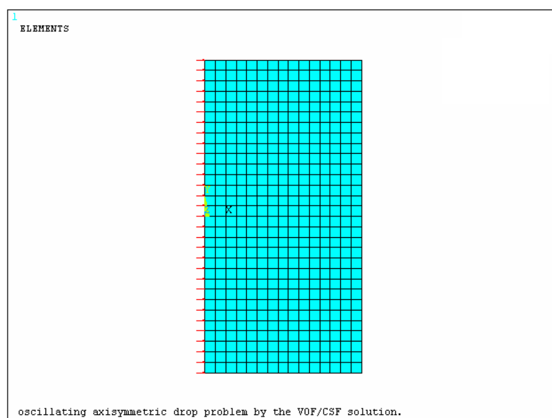
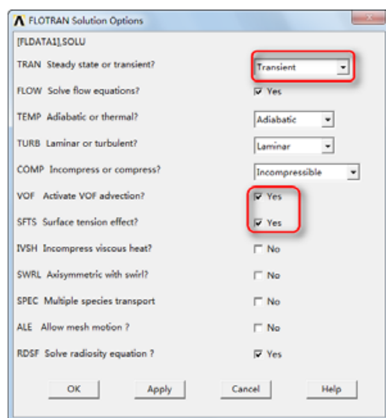



图 7-94 加载后的几何模型

## 7.5.3 求解

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 7-95 所示，在“TRAN　Steady state or transient？”选择列表中选择“Transient”，单击“VOF　Activate VOF advection？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，单击“SFTS　Surface tension effect？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 7-96 所示，采用默认设置。



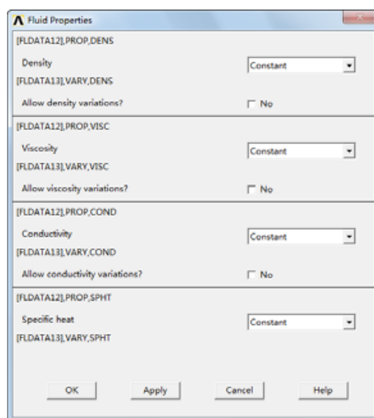




图 7-95 “FLOTRAN Solution Options”对话框　　图 7-96 “Fluid Properties”对话框

❸单击“OK”按钮会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 7-97 所示，在“Density property type CONSTANT　Constant value”输入框中输入 rho，在“Viscosity property type CONSTANT Constant value”输入框中输入 mu，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❹单击“OK”按钮会弹出“Surface tension Properties”对话框，如图 7-98 所示，采

用默认设置。

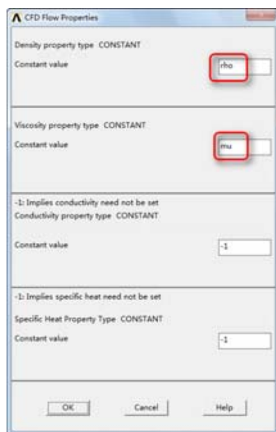



图 7-97 “CFD Flow Properties”对话框

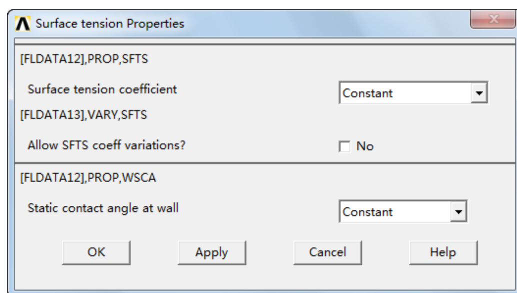



图 7-98 “Surface tension Properties”对话框

❺单击“OK”按钮会弹出“Surface tension Properties”对话框，如图 7-99 所示，在“Surf tens coeff property type CONSTANT　Constant value”输入框输入 sigm，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Time Step Controls”对话框，如图 7-100 所示，在“STEP　Select time step control”后的选择列表选择“User defined”。

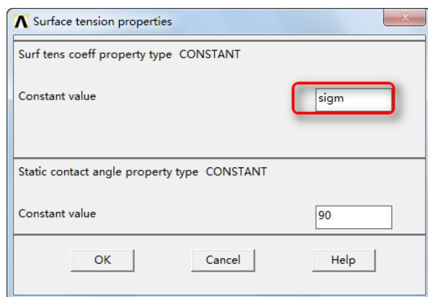



图 7-99 “Surface tension Properties”对话框

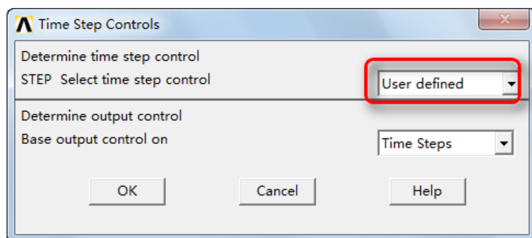



图 7-100 “Time Step Controls”对话框

❼单击“OK”按钮会弹出“Transient Controls”对话框，如图 7-101 所示，在“STEP　User-defined time step”输入框输入 DELT，在“NUMB　Number of time steps”输入框输入 NDT，在“GLOB　Global iter per time step”输入框输入 10，在“STEP，APPE　Number of time steps”输入框输入 APPT，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。




“STEP，APPE　Number of time steps”输入框在对话框下面，需要拖动对话框右边的拉条才能看到。

❽依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Advection，会弹出“Advection Option”对话框，如图 7-102 所示，在“MOME　Momentum equations”单选框里选择“SUPG”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

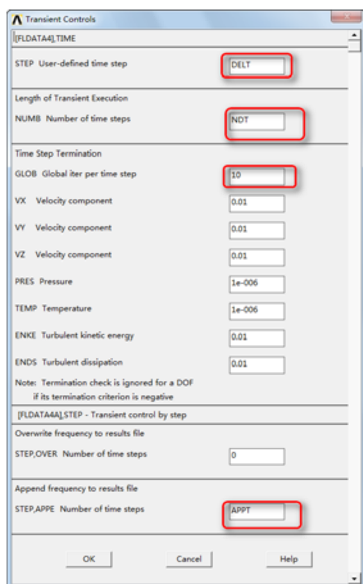



图 7-101 “Transient Controls”对话框

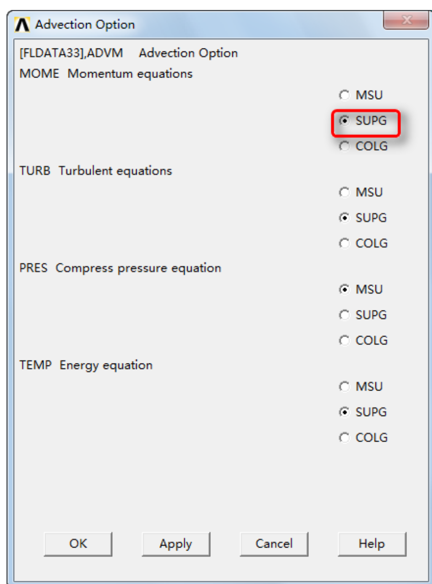



图 7-102 “Advection Option”对话框

❾依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→MIR Stabilization，会弹出“MIR Stabilization”对话框，如图 7-103 所示，在“MOME Momentum Equation”输入框中输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❿依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation，会弹出“DOF Relaxation”对话框，如图 7-104 所示，在“PRES Pressure relaxation”输入框中输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

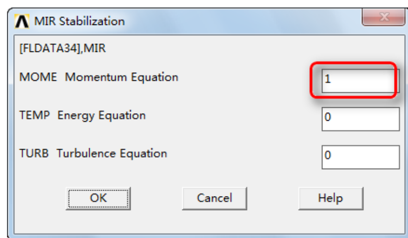



图 7-103 “MIR Stabilization”对话框

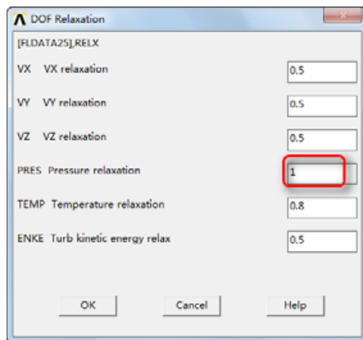



图 7-104 “DOF Relaxation”对话框

⓫依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

⓬依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 7-105 所示。

## 7.5.4 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

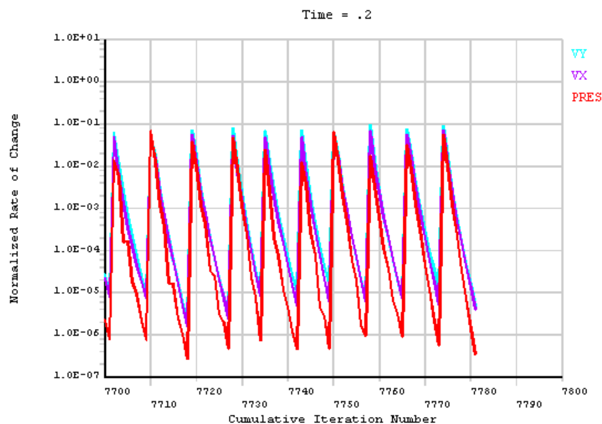



图 7-105 迭代曲线

❷依次选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Volume Fraction，ANSYS 窗口将显示如图 7-106 所示的液滴和周围区域的容积率。

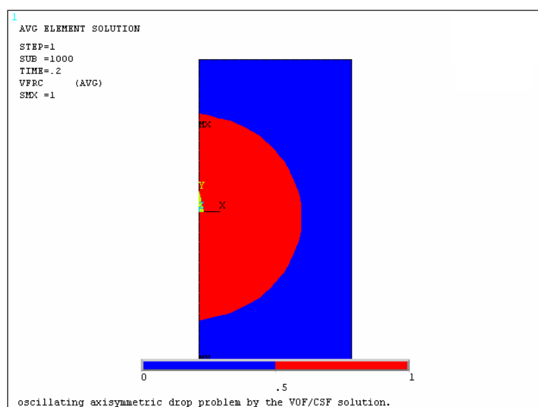



图 7-106 液滴和周围区域的容积率

❸依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Animate→Over Results，会弹出“Animate Over Results”对话框，如图 7-107 所示，在“Model result data”选择框中选择“Result Set Range”，在“Range Minimum，Maximum”输入框中依次输入 1、51，在“Increment result set”输入框中输入 1，在“Animation time delay(sec)”输入框中输入 0.1，在“Display Type”选择列表中选择 VOF data→Volume fraction，其余采用默认设置。

❹单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示上下振荡的液滴动画和“Animation Co…”调节对话框，如图 7-108 所示，调节对话框可以控制液滴上下振荡的速度，单击“Close”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 7-109 所示。

❻在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Pressure，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-110 所示的液滴压力场分布等值线图。

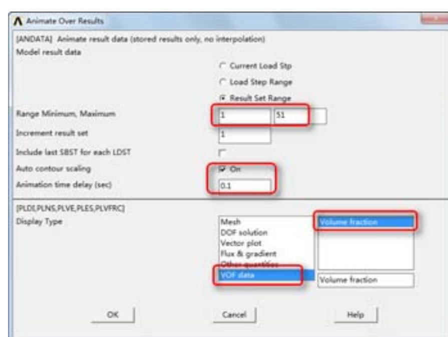



图 7-107 “Animate Over Results”对话框

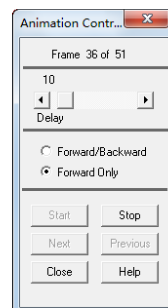



图 7-108 调节对话框

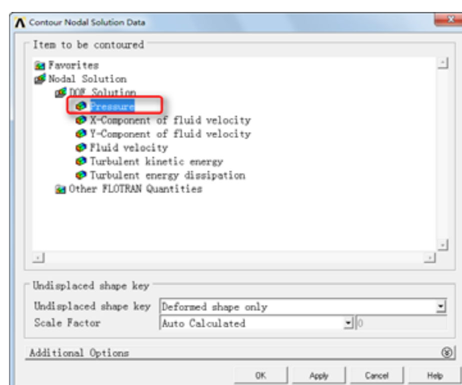



图 7-109 “Contour Nodal Solution Data”对话框

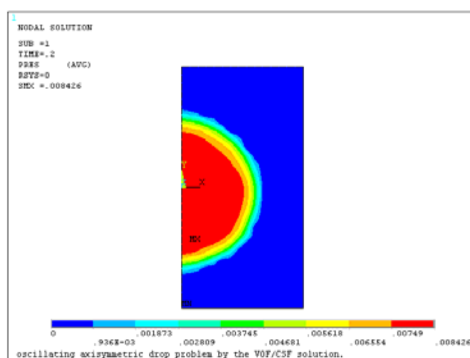



图 7-110 液滴压力场分布等值线图

## 7.5.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

第 8 章

# FLOTRAN 热分析及实例

FLOTRAN 是 ANSYS14.5 用来分析计算流体力学过程或热力学过程的专业模块，可以分析 2D 及 3D 流体流动场。

本章将结合两个具体的例子来介绍 FLOTRAN 热分析，通过实例的学习可以更好地理解和掌握热分析的原理和方法。

学 习 要 点

- FLOTRAN 热分析的功能和基本要求
- FLOTRAN 热分析的求解过程和方法
- 两个实例分析将分步给出指导

# 8.1 FLOTRAN 热分析简介

FLOTRAN CFD 是 ANSYS14.5 用来分析计算流体力学过程或热力学过程的专业模块，可以分析 2 D 及 3 D 流体流动场，其专用单元为 FLUID141 和 FLUID142。

流体分析中通常还会求解流场中的温度分布情况。如果流体性质不随温度而变，就可不解温度方程。在共轭传热问题中，要在同时包含流体区域和非流体区域（即固体区域）的整个区域上求解温度方程。在自然对流传热问题中，流体由于温度分布的不均匀性而导致流体密度分布的不均匀性，从而引起流体的流动。与强迫对流问题不同的是，自然对流通常都没有外部的流动源。

## 8.1.1 FLOTRAN 热分析的功能

1）计算管道系统中热的层化及分离。

2）计算发动机排气系统中气体的压力及温度场的分布场。

3）使用混合流研究估计热冲击的可能性。

4）用自然对流分析来计算电子封装芯片的热性能。

5）研究多种流体的热交换器。

## 8.1.2 FLOTRAN 热分析的基本要求

1．网格划分的要求

在流体热分析中，由于在热边界附近，尤其是在指定热通量的边界附近存在极大的热梯度，因此热边界附近的网格应该具有足够的密度。

2．流体性质的指定和控制

在流体热分析过程中，不仅要指定流体的密度和粘度，而且还必须指定材料的导热系数。

3．温度载荷和边界条件

FLOTRAN 热分析主要支持 6 种热边界条件：

1）恒定温度。

2）常热温度。

3）施加与环境温度相关的对流传热系数。

4）与连带曲面系数和周围温度相关的辐射。

5）与连带曲面系数相关的面面辐射。

6）绝热边界。

此外，恒定的体积热源可设在流体和非流体区域。

表 8-1 列出了 FLOTRAN 热分析中能够施加的载荷信息。表 8-2 列出了 FLOTRAN 热分析中设置载荷的所有命令。

表 8-1 FLOTRAN 热分析中能够施加的载荷

| 载荷类型 | 载　荷 | 命令 | 菜单路径 |
|---|---|---|---|
| Contraints | Temperature（TEMP） | D | Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Temperature |
| Surface Loads | Convection (CONV)<br>Heat Flux (HFLUX)<br>Radiation (RAD) | SF | Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Convection<br>Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Heat Flux<br>Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Radiation |
| Body Loads | Heat Generation Rates(HGEN) | BF | Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Heat Generat |

表 8-2 FLOTRAN 热分析中设置载荷的命令

| 载荷类型 | 实体模型 | 实体 | 施加 | 删除 | 列表 | 操作 | 应用设置 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperature | Finite Element | Nodes | D | DDELE | DLIST | - | - |
| Convection, Heat Flux, Ambient Radiation, or Surface-to-surface Radiation | Solid Model | Lines | SFL | SFLDELE | - | - | - |
| | Solid Model | Areas | SFA | SFADELE | SFALIST | SFARAN | SFGRAD |
| | Finite Element | Nodes | SF | SFDELE | SFLIST | - | - |
| | Finite Element | Elements | SFE | SFEDELE | SFELIST | SFSCALE | - |
| Heat Generation Rates | Finite Element | Elements | SFE | SFEDELE | SFELIST | SFSCALE | - |
| | Solid Model | Lines | SFE | SFEDELE | SFELIST | SFSCALF | - |
| | Solid Model | Areas | BFL | BFLDELE | BFLLIST | BFTRAN | - |
| | Solid Model | Volumes | BFA | BFADELE | BFALIST | BFTRAN | - |
| | Finite Element | Nodes | BF | BFDELE | BFLIST | - | - |
| | Finite Element | Elements | BFE | BFEDELE | BELIST | BFSCALE | - |

## 8.2 FLOTRAN 热分析求解

1）FLOTRAN 热分析的求解内容。

2）FLOTRAN 热分析方法。

3）FLOTRAN 热分析的基本步骤。

### 8.2.1 FLOTRAN 热分析的求解内容

在 FLOTRAN 热分析的求解运算中，作为指定边界的函数，需要知道已知的量和所求的量，如下所示：

1）对于温度边界条件，计算热通量和对流传热系数。

2）对于热通量边界条件，计算温度和对流传热系数。

3）对于辐射边界条件，计算温度和热通量。

4）对于传热边界条件，计算温度和热通量。

5）对于绝热边界条件，计算温度。

另外，在指定了对流传热系数后，还需要指出环境温度，ANSYS 使用该环境温度和表面温度一起来计算热通量。热通量和对流传热系数可以直接施加在固体材料或液体材料的外表面上，而不是直接施加在内边界上。如果一定要在内部边界上指定热通量和换热系数，则 FLOTRAN 会把该条件看成是一个线或面热源。

在计算表面对流传热系数时，ANSYS 程序使用表面温度和平均温度来进行计算，平均温度通过下列方式进行设定：

命令：FLDATA14，TEMP，BULK，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions

如果分析对象为可压缩流体，则温度边界条件是以总温度来表示的，温度方程也是以总温度的形式进行表达和求解的。

FLOTRAN 辐射面载荷可以模拟在常温条件下流体表面的辐射能向空间的辐射传热过程。由于可以穿透流体区域作用在固体上，因此可以在流固交界面和模型的外边缘上施加辐射面载荷。也就是说这种辐射面载荷既可以施加在流体单元表面上，也可以施加在固体单元表面上，还可以施加在实体模型上。

### 8.2.2 FLOTRAN 热分析方法

求解热-流动耦合问题最有效的方法取决于流体性质对温度的依赖程度，可分为以下 4 种情况：

1．常流体性质

在这种情况下，流场的解答和流体性质对温度的依赖程度无关，而且求解在没有激活温度方程的条件就可以收敛。一旦完成了流动解，温度方程就变为线性。因此温度松弛因子设置为 1 后，在一个全局迭代中就可以求解温度方程。具体操作方法如下：

命令：FLDATA25，RELX，TEMP，1.0

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Prop Relaxation

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→Prop Relaxation

2．强制对流与温度相关的物性

在大多数情况下，流动模式和温度场相关性不大，可以在每一个全局迭代过程中选择求解温度方程，或者在激活求解温度方程之前，先进行流场的计算。在后一种情况下，为了改进随着物性变化的流场，仍需要同时求解流动方程和温度方程。

3．自然对流与温度相关的物性

在这种情况下，流动的驱动力来源于由温度变化而引起的流体密度的变化。此时必须激活求解流动和温度选项。具体操作如下：

（1）指定重力加速度

命令：ACEL

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Gravity

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Gravity

（2）激活可变密度选项

命令：FLDATA13，VARY，Label，TRUE

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid properties

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid properties

4．共轭传热

当非流体材料的热物理性能参数与流体热物理性能参数相差较大（达到几个数量级）时，就是病态的共轭传热问题。在这种条件下，不论推进多少，TDMA 方法都不会产生有用的效果。

选取 TDMA 的具体操作方法如下：

命令：FLDATA18，METH，TEMP，1

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→Temp Solver CFD

对于温度方程的求解，TDMA 方法是隐含的选项。与 TDMA 方法相比较，共轭残差法提供了更多的函数，且需要较少的内存空间。选取共轭残差法的具体操作方法如下：

命令：FLDATA18，METH，TEMP，2

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→Temp Solver CFD

### 8.2.3 FLOTRAN 热分析的基本步骤

1）确定问题的区域。用户必须首先确定所分析问题的范围，一般问题的边界设置

在边界条件已知或通过分析可以得到边界条件的地方。如果无法得到精确的边界条件时，尽量不要将边界设置在求解变量变化梯度较大的区域。用户可以先作一次试探性的分析，然后根据分析结果来调整分析区域。

2）确定流体的状态。流体的特征是流体性质、边界条件及流场速度的函数。FLOTRAN 能求解的流体包括气流和液流，而气体只能是理想气体。在分析过程中用户必须确定温度对流体的密度、粘度及导热系数的影响程度。在大多数情况下，认为流体性质不随温度的变化而变化，即可得到足够精确的解答。

3）通常用雷诺数来判断流体流动是层流与湍流，用马赫数来判别流体是否可压缩。马赫数是指流场中任意一点流体速度与该点音速的比值，当马赫数大于 0.3 时，就应考虑用可压缩算法进行求解。

4）生成有限元模型。在生成有限元模型的过程中，用户必须事先确定流场中流体梯度变化较大的地方，从而对于这些地方的网格进行适当的调整。例如，如果采用了湍流模型，在靠近壁面区域的网格密度就必须比层流模型的网格密度大。如果网格太稀疏就不能在求解过程中捕捉到由于巨大梯度变化对流动造成的显著影响。

5）为了得到精确的计算结果，应使用映射网格划分，因为映射网格能在边界上更好地保持恒定的网格特性。

6）施加边界条件。前已述及，可以在实体模型或有限元模型上施加边界条件，此时应模型所有的边界条件都考虑进去。如果与某个变量相关的边界条件没有加上去，则该变量沿边界的法向值的梯度被假设为 0。

7）设置 FLOTRAN 热分析参数。在使用诸如湍流模型或求解温度方程等选项时，用户必须激活它们。而诸如流体性质等特定项目的设置，是与所求解的流体问题的类型相关的。

8）求解计算。通过观察求解过程中相关变量的改变率，可以监视和观察求解的收敛性和稳定性。这些变量包括速度、压力、温度、动能和动能耗散率等湍流量以及有效粘度。

9）查看求解结果。可以通过通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 查看求解结果，也可以在打印输出文件里对求解结果进行检查，此时用户需借助于工程经验或相关资料来对所用的求解方法、所定义的流体性质以及所施加的边界条件的可靠性进行评估。

## 8.3 求解方法

### 8.3.1 连续流体性质

求解热-流动问题最有效的方法取决于流体性质依赖于温度的程度。

在这种情况下，流动解不依赖于温度场，并且不用激活温度方程求解就可以收敛。

一旦流动解是完整的，温度方程就会变为线性的。再使用以下方法把温度的松弛因子设为 1 之后，就可以在一个整体迭代中求解：

命令：FLDATA25，RELX，TEMP，1.0

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap/DOF Relaxation

Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap/Prop Relaxation

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap/DOF Relaxation

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap/Prop Relaxation

通常通过一个半直接求解算法来完美地实现。

在求解温度方程的过程中不需要求解流动方程。如果求解流动方程，在第二次计算过程中，进行两次整体迭代可能会在解中产生一个非常小的变化，这将会在第二次迭代中的温度的收敛监视器中以一个巨大的减小量反映出来。

### 8.3.2 强制对流

流型是一个温度场的舒缓的方程。在激活求解温度方程之前，可以选择每一步整体迭代求解温度方程，或者使流场计算收敛。在后一种情况中，仍然需要同时求解流动和温度方程来用性质变化细化流场。如果在求解早期求解温度方程困难，那么最好从头开始，并且在允许性质随温度变化之前使流动求解部分收敛。

对于不可压缩流动，在低普朗特数情况下或低到中等速度情况下，一般不考虑粘度热。然而只要普朗特数大于 2 或速度较高（例如，在空气中大于 100 m/s），就应该开启粘度热。对于可压缩流动，FLOTRAN 会自动地包括粘度热。为了包括不可压缩流动的粘度热，可使用以下方法：

命令：FLDATA1，SOLU，IVSH，T

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Solution Options

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options

### 8.3.3 自然对流

在这种情况下，流动的驱动力为由温度变化引起的密度变化，必须把两个选项都打开。也必须做到以下几点：

1）确定由重力产生的加速度，可使用以下方法：

命令：ACEL

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Gravity

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Gravity

2）使用以下方法激活变化的密度选项：

命令：FLDATA13，VARY，Label，TURE（Label=fluid property）

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid properties

浮力性质类型，使用一个恒定压力并根据理想气体定理计算密度值，它是为气体提供的。因此，就可以防止压力波动引起温度计算中的不稳定性。自然对流情况收敛比较

缓慢，并且如果对于压力和温度使用 TDMA 算法会更稳定。扫掠数可设为节点数的 1/10，但是应当至少为 100。

## 8.3.4 共轭传热

当非流体材料的热性质与流体相差几个数量级时，就被称为一个病态共轭传热问题。在这种情况下，不管确定了多少扫掠数，TDMA 方法都不可能产生有用的结果。使用以下方法进入 TDMA 方法：

命令：FLDATA18，METH，TEMP，1

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→Temp Solver CFD

共轭残差方法提供了更多的功能，并且需要和三对角线矩阵算法（TDMA）相同的内存。为了进入这种方法，可以使用以下方法：

命令：FLDATA18，METH，TEMP，2

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→Temp Solver CFD

可以控制一些参数（例如收敛性标准和使用的搜索矢量数）来提高性能。

求解病态传热问题的一个更成熟的选择就是预条件共轭残差方法，它需要比 TDMA 或共轭残差方法都大的多的内存。PCR 方法允许控制使用的搜索方向数，最大值可达 30。为了使用它，可使用以下方法：

命令：FLDATA18，METH，TEMP，3

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→Temp Solver CFD



对于仅连接到固体节点上的节点，密度标签下的 Jobname.RFL 文件中存储的值为密度和比热容的乘积。

可通过查看 Jobname.DBG 文件来评估共轭残差和预条件共轭残差方法的性能。

求解共轭传热问题的最成熟（但需要最多内存）的方法为预条件广义最小残差方法，可通过以下方法进入：

命令：FLDATA18，METH，TEMP，4

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→Temp Solver CFD

预条件广义最小残差（PGMR）求解方法是温度的默认选项。

尽管 PGMR 方法的用户控制与 PCCR 法相同，但默认值并不同。对于 PGMR，所允许的最小限制的收敛性判别标准为 $1.0\times10^{-10}$。如果试着使用一个较小的限制收敛性判别标准，FLOTRAN 就会将其改为 $1.0\times10^{-10}$。对于某些问题可能有必要用一个如 $1.0\times10^{-20}$ 的收敛性判别标准。除此之外，应该至少使用 12 个搜索矢量，并且 FLOTRAN 确保了这个数。对于 PGMR 求解器，12 个搜索矢量为默认的，且许用范围为 12～20。

FLOTRAN 非流体单元支持依赖于温度的和正交各向异性的变化，即 KXX、KYY、KZZ 可以假定不同的值和温度变化。FLOTRAN 将导热系数视为一个单元量，在单元中的正交的点处求其值。然而在流体单元中，FLOTRAN 将导热系数视为一个节点量。

为了确定变化的和正交各向异性导热系数，可使用以下方法：

命令：MP 或 MPDATA

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Other→Change Mat Props

Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models→CFD→Conductivity→Orthotropic

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Other→Change Mat Props

Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Other→Change Mat Props


具有可变导热系数的热分析问题是非线性的，且需要大量的迭代数来求解。可变的固体导热系数不是松弛的。

对于一个共轭传热问题，最好在求解耦合能力/动量方程前得到初始的温度解。为了得到温度解，可使用以下方法：

命令：FLDATA1,SOLU,FLOW,F

FLDATA1,SOLU,TEMP,T

FLDATA25,RELX,TEMP,1.0

FLDATA2,ITER,EXEC,1

FLDATA18,METH,TEMP,3

菜单：Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Contr→TEMP Solver CFD

在以上步骤中，根据导热方程的一个解得到一个初始的温度解。

FLOTRAN 能够计算传热问题中的壁面的膜层散热系数。为了达到这个目的，可用两种算法：导热系数矩阵算法和温度场算法。导热系数矩阵算法使用了导热系数矩阵来计算热通量和膜层散热系数，它是默认的。一般说来，这种算法对于良好成型的单元可产生令人满意的结果。然而如果单元没有很好地成型，就会产生不光滑的结果，这时就应该切换到温度场算法。温度场算法可以根据热梯度直接计算膜层散热系数。为了设置算法，可使用以下方法：

命令：FLDATA37,ALGR,HFLM,Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Algorithm Ctr

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Algorithm Ctr

## 8.4 层流流体受均匀壁面热通量

### 8.4.1 问题描述

有一圆柱形导管，传输液体为水银，在入口处受大小为 $p$ 的压力，在导管的外壁施加大小为 $q$ 的壁面热通量，液体水银入口处温度为 $T$，如图 8-1 所示。导管的几何参数、

载荷与水银的材料参数见表 8-3 和表 8-4，求以下假设条件下液体流动过程的速度场、温度场、壁面切应力以及中心线上各点的速度和温度随位移的变化关系曲线。

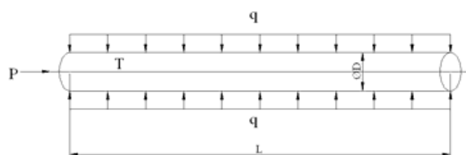



图 8-1 流体在导管中传送示意图

假设条件：

1）液体流动为稳态流动。

2）液体为不可压缩液体。

3）忽略液体的重力。

4）液体材料参数为常量。

5）忽略导管壁面热阻抗。

6）液体径向与轴向速度均为 0。

**表 8-3 液体水银材料参数**

| 密度 $\rho$/（kg/m$^3$） | 粘度 $v$/[kg/（m.s）] | 导热系数 $k$/[W/（m.K）] | 比热容 $C$/[J/（kg.K）] |
|---|---|---|---|
| 13530 | 1.52×10$^{-3}$ | 8.55 | 139.5 |

**表 8-4 导管几何参数及载荷**

| 直径 $D$/m | 长度 $L$/m | 压力 $p$/Pa | 温度 $T$/K | 壁面热通量 $q$/（W/m）$^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.006 | 0.12 | 1 | 350 | 3000 |

该问题研究对象为圆柱形导管内的液体水银。根据问题的轴对称性，取液体水银纵截面的一半，建立有限元计算模型进行分析求解。

## 8.4.2 前处理

**01 定义工作名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名 PIPE，并将“NEW log and error files”设置为“Yes”，如图 8-2 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

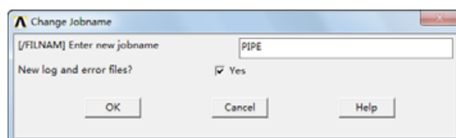



图 8-2“Change Jobname”对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Laminar flow through a pipe subjected to uniform thermal flux”，如图 8-3 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 8-4 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

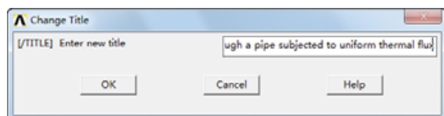



图 8-3 “Change Title”对话框

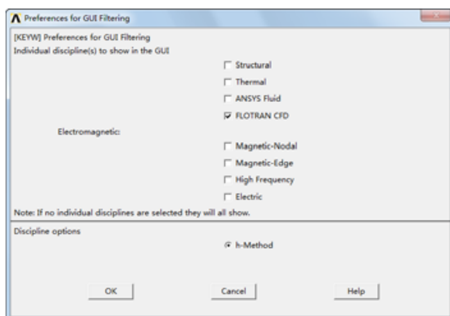



图 8-4 “Preferences for GUI Filtering”对话框

**02** 定义单元类型。

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，会弹出“Element Types”对话框，如图 8-5 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 8-6 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

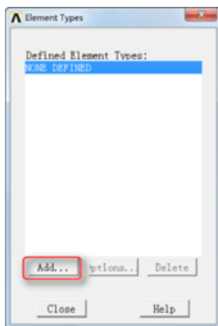



图 8-5 “Element Types”对话框

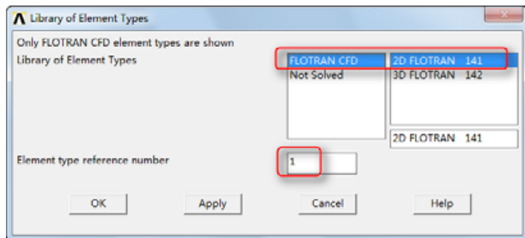



图 8-6 “Library of Element Types”对话框

❹单击“Element Types”对话框中的“Options”按钮，出现“FLUID141 element type options”对话框，在“Element coordinate system K3”下拉框中选择“Axisymm about X”，其余选项均选默认设置，如图 8-7 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

**03** 建立几何模型。

❶依次选择 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，会弹出“Scalar Parameters”对话框，如图 8-8 所示。在输入框中输入 L=0.12，单击“Accept”按钮，然后依次输入以下参数值：

R=0.003

PRES=1.0

TEMP=350

QW=3000

RHO=13530

MU=0.00152

K=8.55

CP=139.5

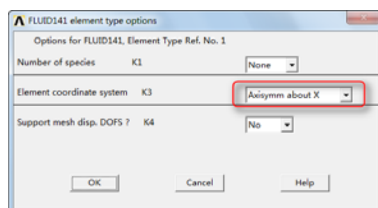



图 8-7 “FLUID141 element type options”对话框



每次输入一个等式，必须单击“Accept”按钮。单击“Close”按钮，关闭“Scalar Parameters”对话框。

❷依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 8-9 所示。

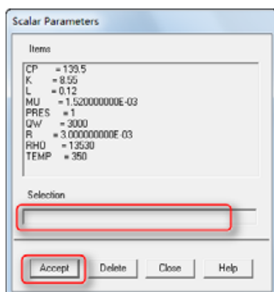



图 8-8 “Scalar Parameters”对话框

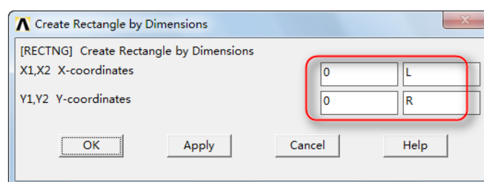



图 8-9 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

❸在“Create Rectangle By Dimensions”对话框中，依次输入 X1=0、X2=L 和 Y1=0、Y2=R，单击“OK”按钮关闭该对话框。依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗口将变成白色，窗口将显示所生成的几何模型，如图 8-10 所示。

❹依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Size and Shape，会弹出“Size and Shape”对话框，在“RATOY Y distortion ratio”输入框中输入 10，其余选项采用默认设置，如图 8-11 所示。




图 8-10 生成的几何模型

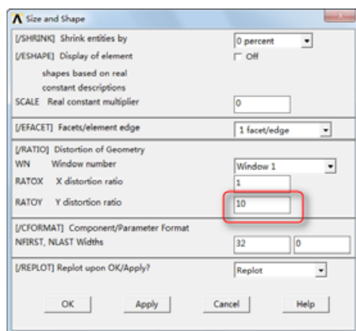


图 8-11 “Size and Shape”对话框

❺单击“OK”按钮，关闭“Size and Shape”对话框。ANSYS 显示窗口会显示沿 Y 方向放大 10 倍的几何模型，如图 8-12 所示。该操作只是在显示时将模型 Y 方向放大 10 倍，并不影响 ANSYS 的计算过程。



图 8-12 径向放大 10 倍的几何模型

**04** 划分网格。

❶依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❷依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，选择“LINE Line numbers”，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，如图 8-13 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

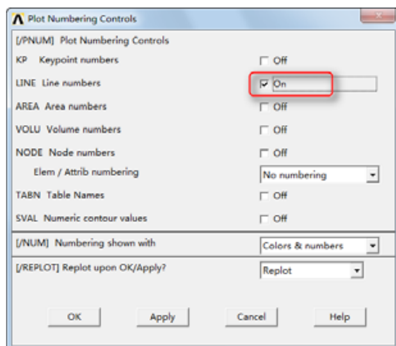


图 8-13 “Plot Numbering Controls”对话框

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size cntrls→ManualSize→Lines→Picked lines，会弹出选择对话框，如图 8-14 所示。

❹参照所建立的几何模型，选择线段 L2、L4，单击“OK”按钮，会弹出“Element Size On Picked Lines”对话框，在“NDIV No. of element”输入框中输入 10，在“SPACE Space ratio”输入框中输入-2，如图 8-15 所示。单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size cntrls→ManualSize→Lines→Picked lines，会弹出选择对话框，如图 8-14 所示。

❻参照所建立的几何模型，选择线段 L1、L3，单击“OK”按钮，会弹出“Element Size On Picked Lines”对话框，在“NDIV　No. of element”输入框中输入 100，在“SPACE Space ratio”输入框中输入-2，单击“OK”按钮关闭对话框。

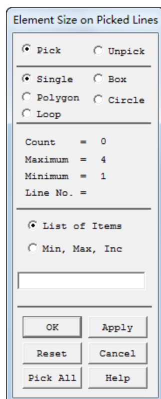



图 8-14 选择对话框

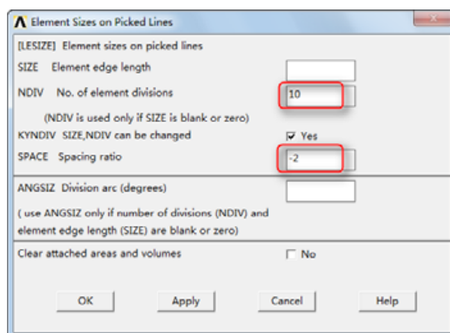



图 8-15 “Element Size On Picked Lines”对话框

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Area→free，单击“Pick All”按钮，网格划分后的效果如图 8-16 所示。

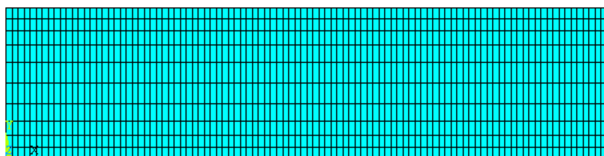


图 8-16 网格划分结果显示

**05 定义边界条件。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择 Lines，在第二个下拉框中选择“By Num/pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 8-17 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L3，单击“OK”按钮关闭对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 8-18 所示。单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 8-19 所示。

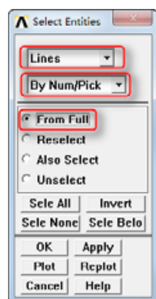



图 8-17 “Select Entities”对话框

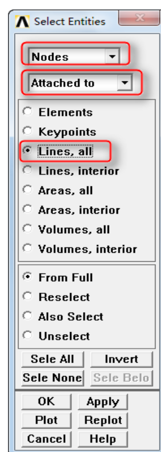



图 8-18 “Select Entities”对话框

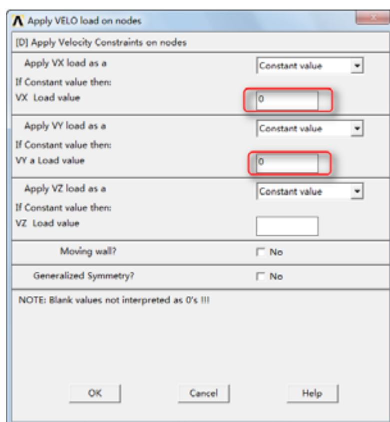



图 8-19 “Apply VELO load on Nodes”对话框

❻“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VX  Load value”输入框中输入 0，在“VY  a Load value”输入框中输入 0，如图 8-19 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。设置完成后的模型如图 8-20 所示。

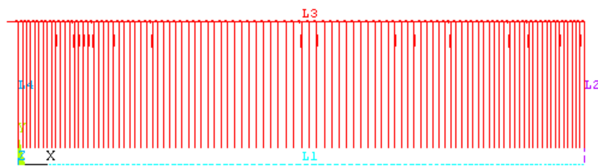



图 8-20 施加速度载荷后的模型

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Heat Flux→On Nodes，会弹出“Apply HFLUX on nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply HFLUX on nodes”对话框，如图 8-21 所示。

❽“Apply HFLUX on nodes”对话框中，在“VALUE  Load HFLUX value”输入框

中输入 QW，如图 8-21 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

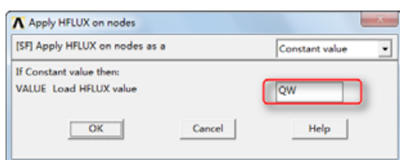



图 8-21 “Apply HFLUX on nodes”对话框

❾依次选择 Utility Menu→Select→Everything，依次选择 Utility Menu→Plot→Replot。

❿依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 8-17 所示。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/pick”，在第三个单选框中选择“From Full”。

⓫单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，用鼠标在模型上选取编号为 L1 的线段，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓬依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓭依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on nodes”对话框，如图 8-19 所示，在“VY　a Load value”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。设置完成后的模型如图 8-22 所示。

⓮依次选择 Utility Menu→Select→Everything，单击 Utility Menu→Plot→Replot 命令。

⓯依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 8-17 所示。在第一个下拉框中选择 Lines，在第二个下拉框中选择“By Num/pick”，在第三个单选框中选择“From Full”。

⓰单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，用鼠标在模型上选取编号为 L4 的线段，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓱依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓲依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 8-19 所示，在“VY　a Load value”输入框中输入 0，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。设置完成后的模型，如图 8-23 所示。

⓳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→TEMPERATURE→On Nodes，会弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框。单击“Pick All”

按钮，会弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框，如图 8-24 所示。在“Lab DOFsto be constrained”选择框中选择 TEMP，在“VALUE Load TEMP value”输入框中输入 TEMP，单击“OK”按钮关闭该对话框。施加温度载荷后的模型如图 8-25 所示。

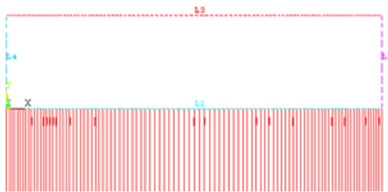



图 8-22 在 L1 施加速度载荷后的模型

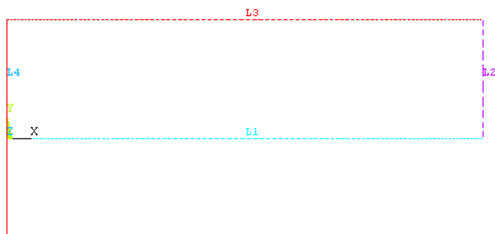



图 8-23 在 L4 施加速度载荷后的模型

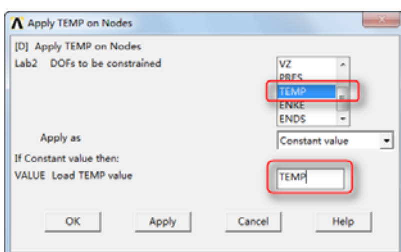



图 8-24 “Apply TEMP on Nodes”对话框

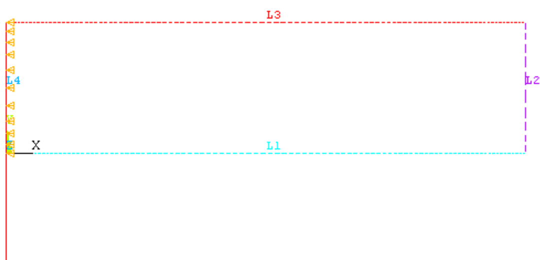



图 8-25 在 L4 施加温度载荷后的模型

⑳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Nodes，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框，如图 8-26 所示。在“PRES Pressure value”输入框中输入 PRES，单击“OK”按钮关闭该对话框。施加压力载荷后的模型如图 8-27 所示。

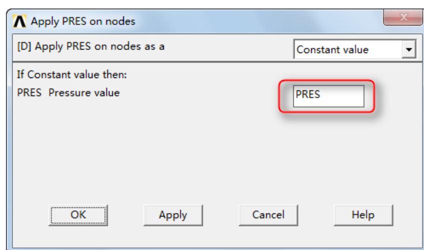



图 8-26 “Apply PRES on nodes”对话框

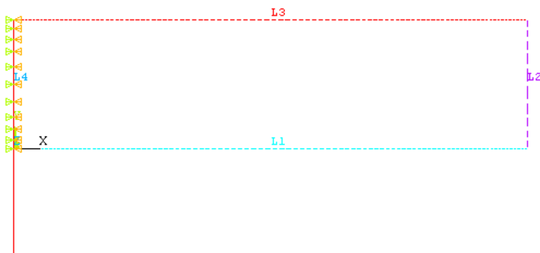



图 8-27 在 L4 施加压力载荷后的模型

㉑依次选择 Utility Menu→Select→Everything，单击 Utility Menu→Plot→Replot 命令。

㉒依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 8-17 所示。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/pick”，在第三个单选框中选择“From Full”。

㉓单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，用鼠标在模型上选取编号为

L2 的线段，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉔依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉕依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 8-19 所示，在“VY　a Load value”输入框中输入 0，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉖依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Nodes，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框，如图 8-26 所示。在“PRES　Pressure value”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉗依次选择 Utility Menu→Select→Everything，单击 Utility Menu→Plot→Elements，ANSYS 显示窗口将显示加载后的结果，如图 8-28 所示。

㉘单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

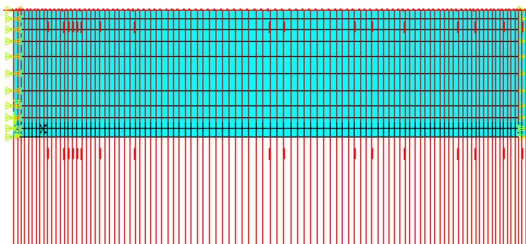


图 8-28 全部加载后的结果显示

## 8.4.3 求解

❶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 8-29 所示。在“EXEC　Global iterations”输入框中输入 300，“OVER　rfl file overwrite freq”输入框中输入 10，其他设置默认，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，在下拉框中选择“Constant”，即默认设置，如图 8-30 所示。单击“OK”按钮，会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 8-31 所示。在 4 个输入框中依次输入 RHO、MU、K、CP，如图 8-31 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions，会弹出“Reference Conditions”对话框，在“[FLDATA14]，TEMP，NOMI Norminal TTEMPERATURE”输入框中输入 TEMP，其余选项采用默认设置，如图 8-32 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

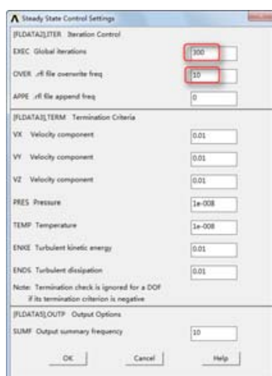



图 8-29 “Steady State Control Settings”对话框




图 8-30 “Fluid Properties”对话框

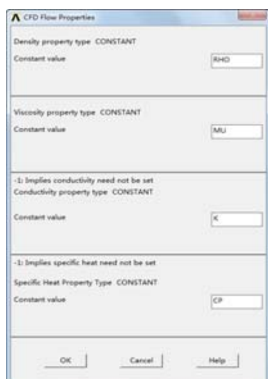



图 8-31 “CFD Flow Properties”对话框

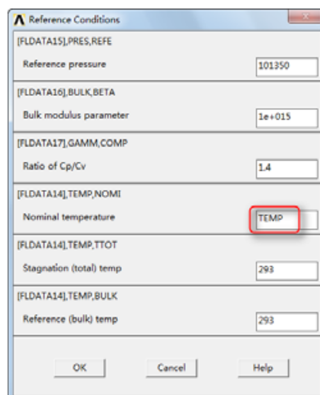



图 8-32 “Reference Conditions”对话框

❹依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Additional Out→RFL Out Derived，会弹出“RFL Output Derived”对话框，在“TAUW Output wall shear stress?”后的框中单击一下，“No”会变成“Yes”，其余设置默认，如图 8-33 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❻依次选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，会弹出“STATUS Command”对话框和“Solve Current Load Step”对话框，如图 8-34 和图 8-35 所示。关闭“STATUS Command”对话框，单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮，ANSYS 开始求解计算。

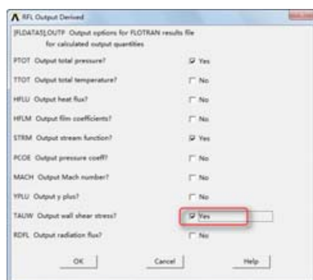



图 8-33 “RFL Output Derived”对话框

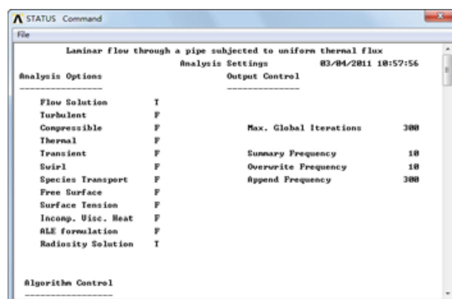



图 8-34 “STATUS Command”对话框

❼求解结束以后，ANSYS 显示窗口将出现“Note” 对话框，如图 8-36 所示，单击其上的“Close”按钮关闭该对话框。求解迭代曲线如图 8-37 所示。

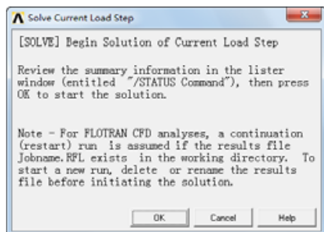



图 8-35 “Solve Current Load Step”对话框

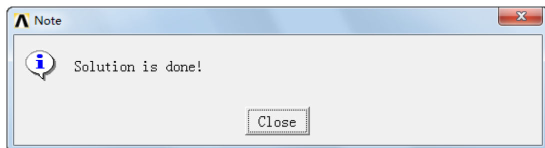



图 8-36 “Note”对话框

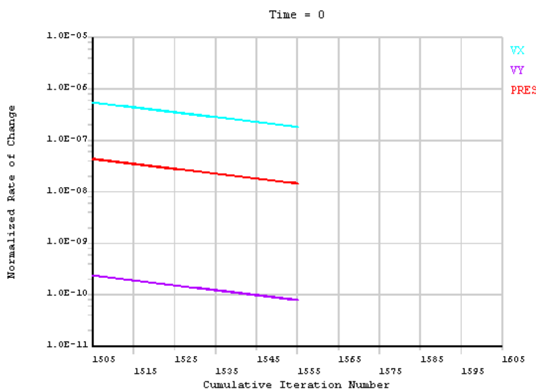



图 8-37 迭代曲线

❽依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 8-38 所示，在“EXEC Global Iterations”输入框中输入 50，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 8-39 所示，按图进行设置后，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❿依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cape→DOF Relaxation，会弹出“DOF Relaxation”对话框，如图 8-40 所示，在“TEMP TTEMPERATURE relaxation”输入框中输入 1，其余选项均采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

⓬依次选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，会弹出“STATUS Command”对话框和“Solve Current Load Step”对话框，如图 8-34 和图 8-35 所示。关闭“STATUS Command”对话框，单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮，ANSYS 开始求解计算。

⓭求解结束后，ANSYS 显示窗口将出现“Note” 对话框，如图 8-36 所示，单击其上的 Close 按钮关闭该对话框。求解迭代曲线如图 8-41 所示。

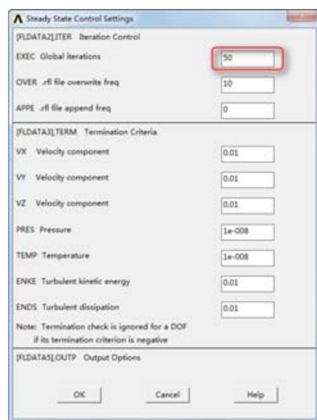


图 8-38 “Steady State Control Settings”对话框

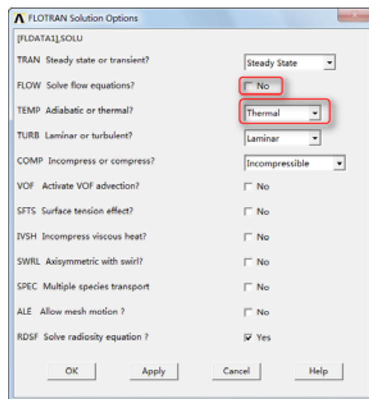


图 8-39 “FLOTRAN Solution Options”对话框

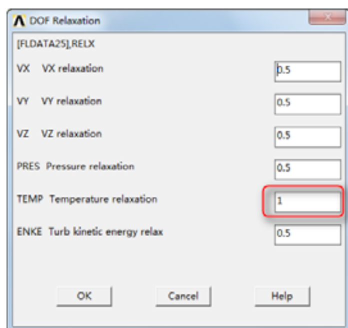


图 8-40 “DOF Relaxation”对话框

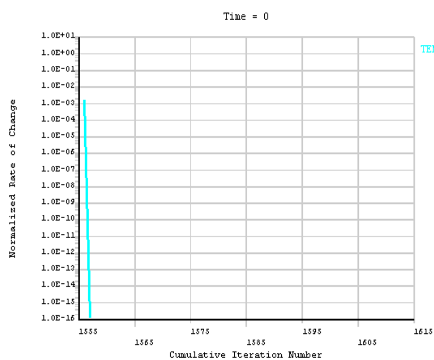


图 8-41 迭代曲线

⓮单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

### 8.4.4 后处理

❶依次选择 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set。

❷依次选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 8-42 所示。

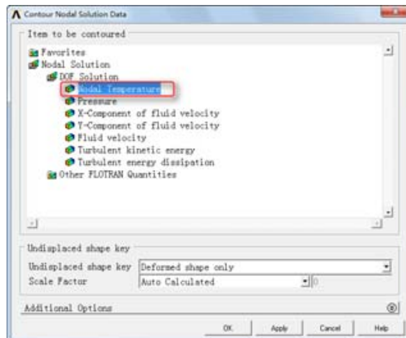


图 8-42 “Contour Nodal Solution Data”对话框

❸在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Nodal Temperature，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 8-43 所示的流体纵截面温度场分布等值线图。

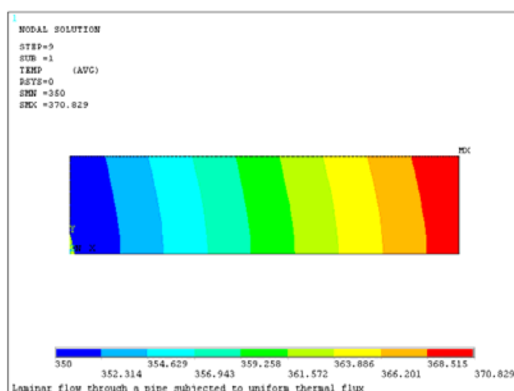



图 8-43　流体纵截面温度场分布等值线图

❹重复第❷步操作。在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→X-Component of fluid velocity，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 8-44 所示的流体轴向速度场分布等值线图。

❺重复第❷步操作。在“Item to be contoured”列表框中依次选择 Other FLOTRAN Quantities→Shear stress at the wall，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 8-45 所示的流体与导管壁间的壁面切应力场分布等值线图。

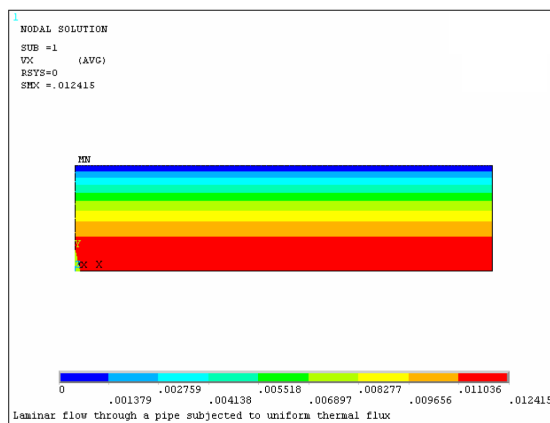



图 8-44　流体轴向速度场分布等值线图

❻依次选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Location，会弹出“By Location”对话框，如图 8-46 所示，在“Name Define Path Name”输入框中输入“PIPE1”，其余选项采用默认设置。

❼单击“OK”按钮，会弹出“By Location in Global Cartesian”对话框，如图 8-47 所示，在“NPT Path point number”输入框中输入 1，在“X，Y，Z　Location in Global CS”输入框中依次输入 L、0、0，单击“OK”按钮，会再次弹出“By Location in Global Cartesian”对话框，在“NPT　Path point number”输入框中输入 2，在“X，Y，Z　Location in Global

CS”输入框中依次输入 L、R、0，单击“OK”按钮，会再次弹出“By Location in Global Cartesian”对话框，在弹出的对话框中单击“Cancal”按钮关闭该对话框。

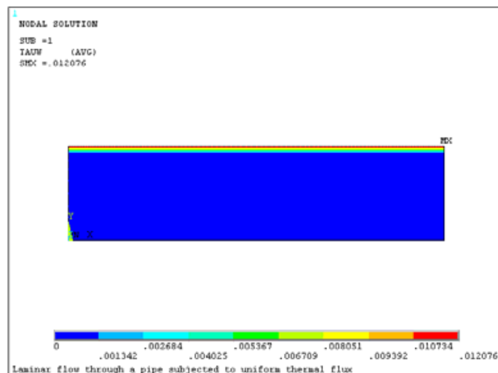



图 8-45 流体与导管壁间的壁面切应力场分布等值线图

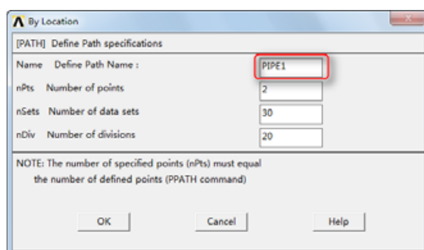



图 8-46 “By Location”对话框

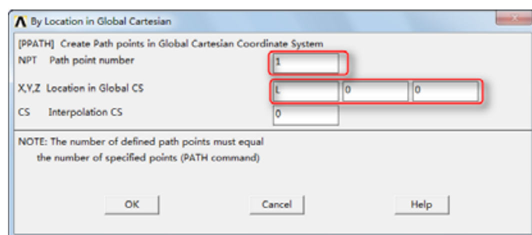



图 8-47 “By Location in Global Cartesian”对话框

❽依次选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path，会弹出“Map Result Items onto Path”对话框，如图 8-48 所示，在“Lab User label for item”输入框中输入 VX，在“Item，Comp Item to be mapped”列表框中选择 DOF solution→Velocity VX，其余选项采用默认设置。单击“Apply”按钮，在“Lab User label for item”输入框中输入 TEMP，在“Item，Comp Item to be mapped”列表框中选择 DOF solution→TTEMPERATURE TEMP，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Size and Shape，会弹出“Size and Shape”对话框，如图 8-11 所示，在“RATOY Y distortion ratio”输入框中输入 1，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。使模型在 Y 方向上缩小到原来的 1/10，恢复原始模型。

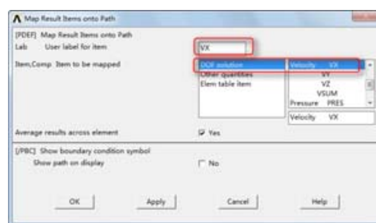


图 8-48 “Map Result Items onto Path”对话框

⑩依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会弹出“Change Title”对话框，在输入框中输入“Axial velocity profile，VX（R）”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑪依次选择 Utility Menu→PlotCtrcl→Styles→Graphs→Modify Axes，会弹出“Axes Modifications for Graph Plots”对话框，如图 8-49 所示，在“[/AXLAB]　X-axis label”输入框中输入“RADITAL COORDINATE，（n）”，在“[/AXLAB]　Y-axis label”输入框中输入“VELOCITY，（n/sec）”，在“[/GTHK]　Thickness of axes”选择列表中选择“Triple”，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

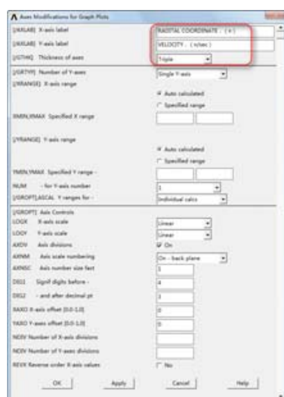


图 8-49 “Axes Modifications for Graph Plots”对话框

⑫依次选择 Utility Menu→PlotCtrcl→Styles→Graphs→Modify Curves，会弹出“Curve Modifications for Graph Plots”对话框，如图 8-50 所示，在“[/GTHK]　Thickness of curves”选择框中选择“Triple”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

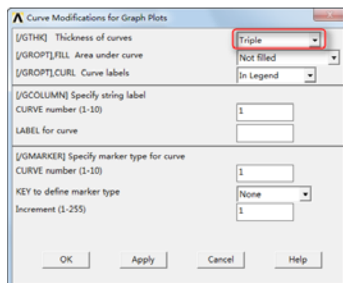



图 8-50 “Curve Modifications for Graph Plots”对话框

⑬依次选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Item→On Graph，会弹出“Plot of Path Items on Graph”对话框，如图 8-51 所示，在列表中选择 VX，单击“OK”按钮，ANSYS 显示框口将显示出口处流体轴向速度和径向位移的关系曲线，如图 8-52 所示。

⑭依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会弹出“Change Title”对话框，在输入框中输入“Outlet tTEMPERATURE profile，T（R）”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑮依次选择 Utility Menu→PlotCtrcl→Styles→Graphs→Modify Axes，会弹出“Axes Modification for Graph Plots”对话框，如图 8-49 所示，在“[/AXLAB]　X-axis label”输入框中输入“RADITAL COORDINATE，（m）”，在“[/AXLAB]　Y-axis label”输入框中输入“TEMPERATURE，（K）”，在“[/GTHK]　Thickness of axes”选择列表中选择“Triple”，其余选项默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

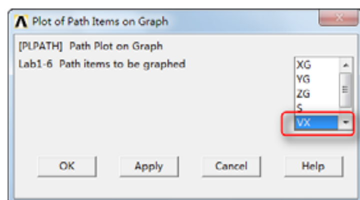



图 8-51 “Plot of Path Items on Graph”对话框

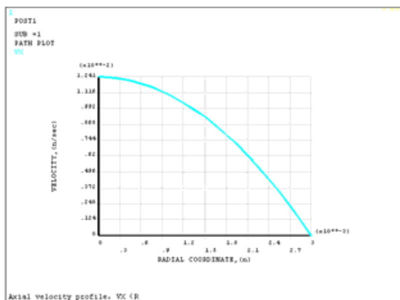


图 8-52 出口处流体轴向速度和径向位移的关系曲线

⑯依次选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Item→On Graph，会弹出“Plot of Path Items on Graph”对话框，如图 8-51 所示，在列表中选择 TEMP，单击“OK”按钮，ANSYS 显示框口将显示出口处流体温度和径向位移的关系曲线，如图 8-53 所示。

⑰依次选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Location，会弹出“By Location”对话框，如图 8-46 所示，在“Name　Define Path Name”输入框中输入 PIPE2，其余选项采用默认设置。

⑱单击“OK”按钮，会弹出“By Location in Global Cartesian”对话框，如图 8-47 所示，在“NPT　Path point number”输入框中输入 1，在“X，Y，Z　Location in Global CS”输入框中依次输入 0、0、0，单击“OK”按钮，会再次弹出“By Location in Global Cartesian”对话框，在“NPT　Path point number”输入框中输入 2，在“X，Y，Z　Location

in Global CS”输入框中依次输入 L、0、0，单击“OK”按钮，会再次弹出“By Location in Global Cartesian”对话框，在弹出的对话框单击“Cancal”按钮关闭该对话框。

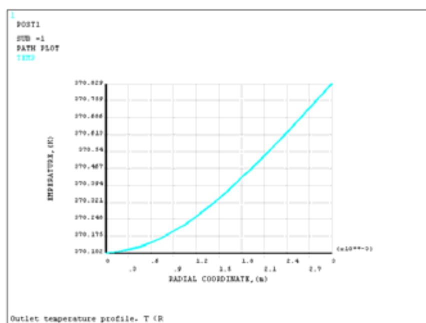



图 8-53 出口处流体温度和径向位移的关系曲线

⓳依次选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path，会弹出“Map Result Items onto Path”对话框，如图 8-48 所示，在“Lab　User label for item”输入框中输入 TEMP，在“Item，Comp　Item to be mapped”列表框中选择 DOF solution→TTEMPERATURE TEMP，其他均采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓴依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会弹出“Change Title”对话框，在输入框中输入“Centerline tTEMPERATURE profile，T（A）”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉑依次选择 Utility Menu→PlotCtrcl→Styles→Graphs→Modify Axes，会弹出“Axes Modifications for Graph Plots”对话框，如图 8-49 所示，在“[/AXLAB]　X-axis label”输入框中输入“TTEMPERATURE，（K）”，在“[/AXLAB]　Y-axis label”输入框中输入“TEMPERATURE，（K）”，在“[/GTHK]　Thickness of axes”选择列表中选择 Triple，其余选项默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉒依次选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Item→On Graph，会弹出“Plot of Path Items on Graph”对话框，如图 8-51 所示，在列表中选择 TEMP，单击“OK”按钮，ANSYS 显示框口将显示中心轴线上流体温度和轴向位移的关系曲线，如图 8-54 所示。

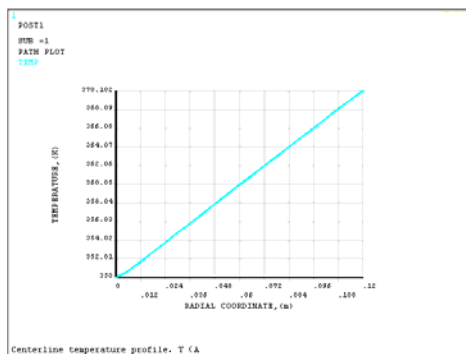



图 8-54 中心轴线上流体温度和轴向位移的关系曲线

### 8.4.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

## 8.5 空腔中空气的热稳态层流分析

### 8.5.1 问题描述

这个例子是求解不同垂直边界的正方形空腔内气体的流动情况。正方形空腔如图 8-55 所示，空腔内气体为空气，工作环境名义温度为 193K，参考压力为 $1.0135\times10^5$Pa，重力加速度为 9.81m/s$^2$，雷诺数为 $1.01\times10^5$，空腔左壁面承受载荷 $T_1$=350K，空腔右壁面承受载荷 $T_2$=260K，求空腔内气体流动情况。

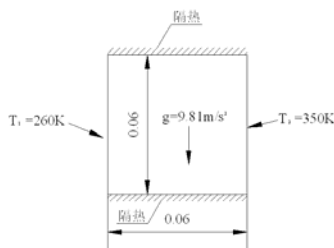



图 8-55 正方形空腔示意图

由空腔两边的温度差引起的密度差异使气体层流流动。流动的 Reyleigh 数定义为

$$Ra = g\beta\Delta TL^3\rho^2C_p / \kappa\mu$$

式中，$g$ 为重力加速度；$\beta$ 为温度 $T$ 的倒数，即 $1/T$；$\Delta T$ 为冷热流体的温度差；$L$ 为空腔边长度；$\rho$ 为流体密度；$C_p$ 为流体比热容；$K$ 为导热系数；$\mu$ 为流体粘度。

由于空腔内气体温度变化导致了气体密度的变化，而气体的密度变化又引起了层流流动。在分析过程中选择空腔建立几何模型，采用 FLUID141 热-流耦合单元进行求解。

### 8.5.2 前处理

**01 定义工作名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名 Square Cavity，并将 NEW log and error files 设置为 Yes，如图 8-56 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Buoyancy driven flow in a square cavity”，如图 8-57 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

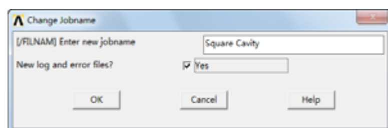



图 8-56 “Change Jobname”对话框

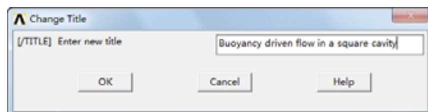



图 8-57 “Change Title”对话框

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 8-58 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

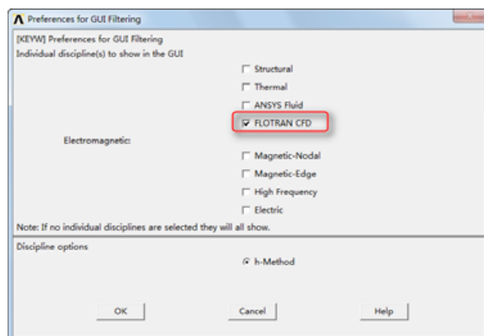



图 8-58 “Preferences for GUI Filtering”对话框

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，会弹出“Element Types”对话框，如图 8-59 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 8-60 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。




图 8-59 “Element Types”对话框

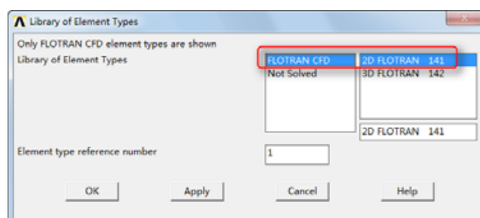



图 8-60 “Library of Element Types”对话框

❹单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

**03** 建立几何模型。

❶依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Actives CS，会弹出“Create Keypoints In Actives Coordinate System”对话框，在“NPT Keypoints number”输入框中输入关键点编号 1，在“X、Y、Z Location in active CS”输入框中依次输入 0，0，0，如图 8-61 所示。

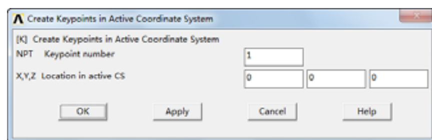



图 8-61 “Create Keypoints In Actives Coordinate System”对话框

❷单击“Apply”按钮，会再次弹出”Create Keypoints In Actives Coordinate System”对话框，在“NPT Keypoints number”输入框中输入关键点编号 2，在“X、Y、Z Location in active CS”输入框中依次输入 0.06，0，0。

❸单击“Apply”按钮，会再次弹出”Create Keypoints In Actives Coordinate System”对话框，在“NPT Keypoints number”输入框中输入关键点编号 3，在“X、Y、Z Location in active CS”输入框中依次输入 0.06，0.06，0。

❹单击“Apply”按钮，会再次弹出”Create Keypoints In Actives Coordinate System”对话框，在“NPT Keypoints number”输入框中输入关键点编号 4，在“X、Y、Z Location in active CS”输入框中依次输入 0，0.06，0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺单击 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Arbitrary → Throughout KPs，会弹出“Create Area thus”对话框，依次选择 1、2、3、4 四个点，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗口将变成白色。依次选择 Utility Menu→Plot→Areas，窗口将显示所生成的几何模型，如图 8-62 所示。

❼单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

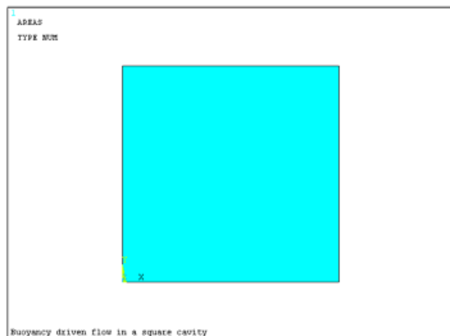



图 8-62 生成的几何模型

**04** 划分网格。

❶依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，如图 8-63 所示，选择“LINE　Line numbers”，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

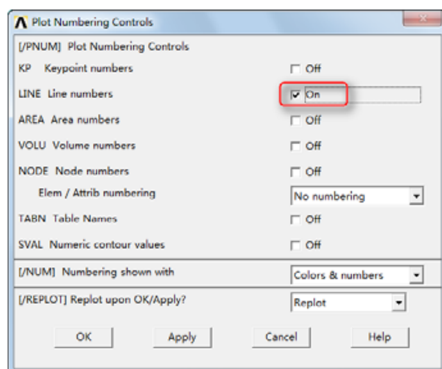



图 8-63　“Plot Numbering Controls”对话框

❷依次选择 Unlity Menu→Plot→Lines，显示所有线段，如图 8-64 所示。

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Elemental Size on”对话框，用鼠标在 ANSYS 显示窗口依次选择四条线段，单击“OK”按钮，会弹出“Element Size On Picked Lines”对话框，如图 8-65 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框中输入 30 ，单击“OK”按钮。

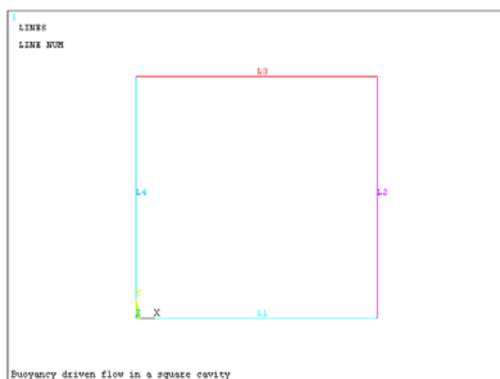



图 8-64　组成模型的线段

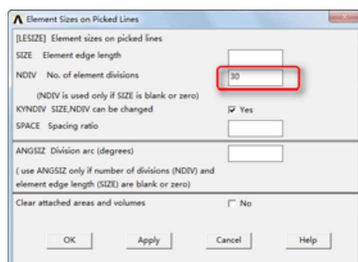



图 8-65　“Element Size On Picked Lines”对话框

❹依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Free，会弹出 Mesh Area 对话框，单击“Pick All”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❻依次选择 Utility Menu→Plot→Elements，ANSYS 显示窗口将显示如图 8-66 所示的网格划分结果。

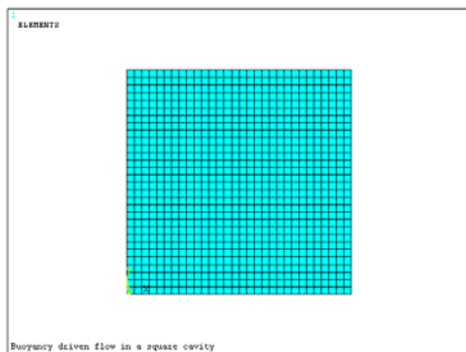



图 8-66　网格划分结果显示

❼单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**05 定义边界条件。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择 Exterior，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 8-67 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 8-68 所示，在“VX　Load value”输入框中输入 0，在“VY　a Load value”输入框中输入 0，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 8-67 所示。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/pick”，在第三个单选框中选择“From Full”。单击“OK”按钮会弹出“Select Lines”对话框，用鼠标选择腔体左边的线段，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 8-67 所示。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，在第四个单选框中选择“From Full”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes，会弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框，如图 8-69 所示。在 Lab2　DOFs to be

constrained 列表中选择 TEMP，在“VALUE Load TEMP value”输入框中输入 350，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 8-67 所示。在第一个下拉框中选择 Lines，在第二个下拉框中选择“By Num/pick”，在第三个单选框中选择“From Full”。单击“OK”按钮会弹出“Select Lines”对话框，用鼠标选择腔体右边的线段，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 8-67 所示。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，在第四个单选框中选择“From Full”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes，会弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框，如图 8-69 所示。在“Lab2 DOFs to be constrained”列表中选择“TEMP”，在“VALUE Load TEMP value”输入框中输入 260，单击“OK”按钮关闭该对话框。

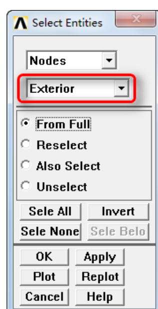



图 8-67 “Select Entities”对话框

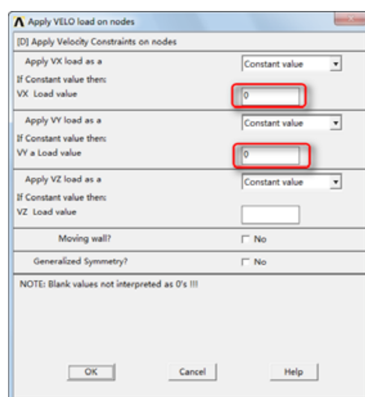



图 8-68 “Apply VELO load on Nodes”对话框

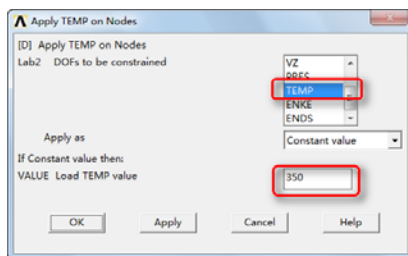



图 8-69 “Apply TEMP on Nodes”对话框

❿施加载荷后的结果如图 8-70 所示。

⓫单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

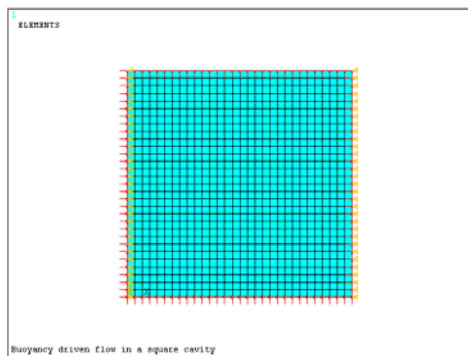


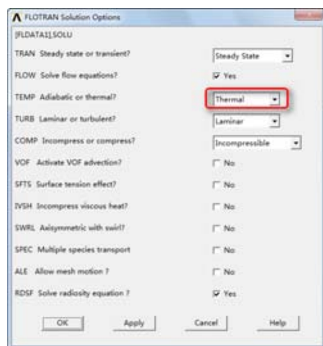

图 8-70 加载后的结果显示

## 8.5.3 求解

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 8-71 所示。在“TEMP Adiabatic or thermal”下拉框中选择“Thermal”，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 8-72 所示，在“EXEC Global Iterations”输入框中输入 200，在“OVER .rfl file overwrite freq”输入框中输入 50，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。



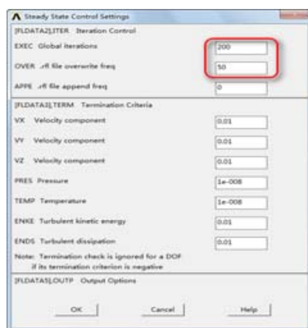


图 8-71 FLOTRAN Solution Options 对话框　图 8-72 “Steady State Control Settings”对话框

❹依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 8-73 所示，在“Density”下拉框中选择“AIR-SI”，单击“Allow density variations”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，在“Visosity”下拉框中选择 AIR-SI，在“Conductivity”下拉框中选择 AIR-SI，在“Specific heat”下拉框中选择“AIR-SI”，其余选项默认设置。单击“OK”按钮，会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 8-74 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。




图 8-73 “Fluid Properties”对话框

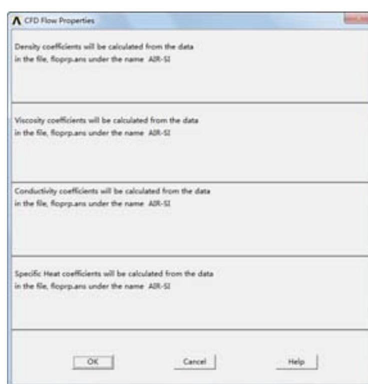



图 8-74 “CFD Flow Properties”对话框

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Gravity，会弹出“Gravity Specification”对话框，在“ACELY　Accel in Y direction”输入框中输入 9.81，其余选项采用默认设置，如图 8-75 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Control→PRES Solver CFD，会弹出“PRES Solver CFD”对话框，选择“TDMA”，如图 8-76 所示，单击“OK”按钮，会弹出“TDMA Pressure”对话框，在“No. of TDMA sweeps for pressure”输入框中输入 100，如图 8-77 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼依次选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，会弹出“STATUS Command”对话框和“Solve Current Load Step”对话框，如图 8-78 和图 8-79 所示，关闭“STATUS Command”对话框，单击“Solve Current Load Step”对话框上的“OK”按钮，ANSYS 开始求解计算。

❽求解结束以后，“ANSYS”显示窗口将出现 Note 提示框，如图 8-80 所示，单击其上的 Close 按钮关闭该对话框。求解迭代曲线如图 8-81 所示。

❾单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。




图 8-75 Gravity Specification 对话框

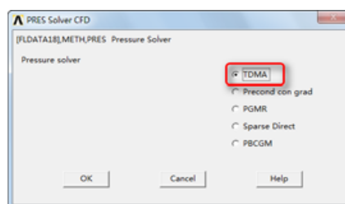



图 8-76 PERS Solver CFD 对话框

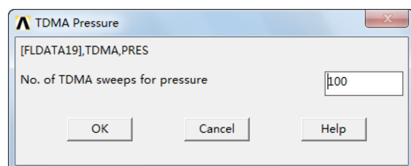



图 8-77 “TMDA Pressure”对话框

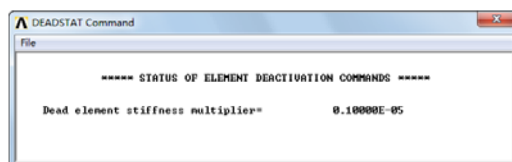



图 8-78 “STATUS Command”对话框

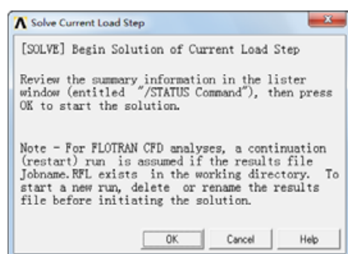



图 8-79 “Solve Current Load Step”对话框

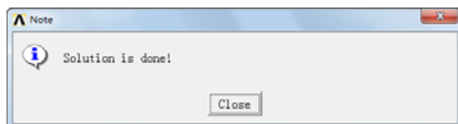



图 8-80 Note 对话框

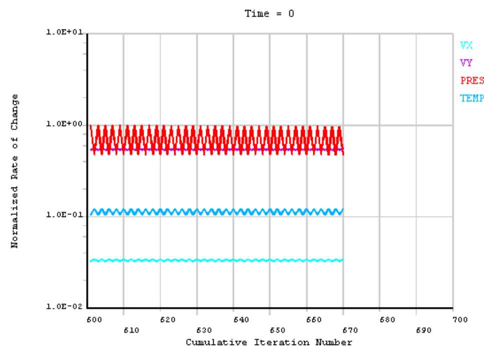



图 8-81 迭代曲线

## 8.5.4 后处理

❶依次选择 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set。

❷依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会弹出“Change Title”对话框，在输入框中输入“Contours of temperature”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 8-82 所示。

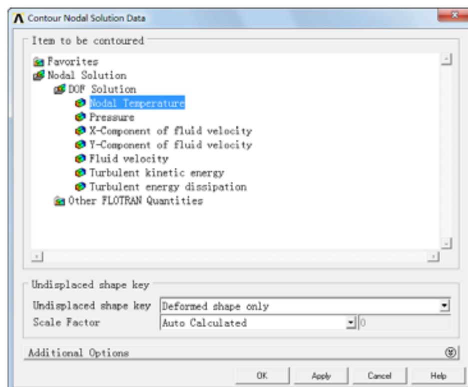



图 8-82 “Contour Nodal Solution Data”对话框

❹在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Nodal TTEMPERATURE，单击“OK”按钮，“ANSYS”窗口将显示如图 8-83 所示的温度场分布等值线图。

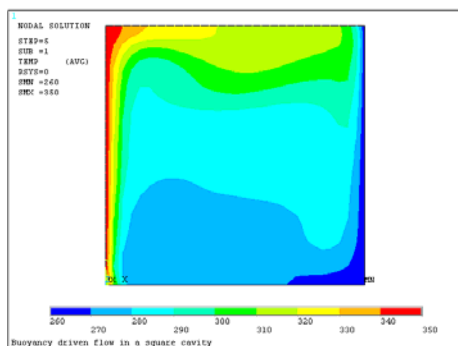



图 8-83 温度场分布等值线图

❺依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会弹出“Change Title”对话框，在输入框中输入“Contours of steamline”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻重复第❸步操作。在“Item to be contoured”列表框中依次选择 Other FLOTRAN Quantities→Stream function – 2D，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 8-84 所示的流线型等值线图。

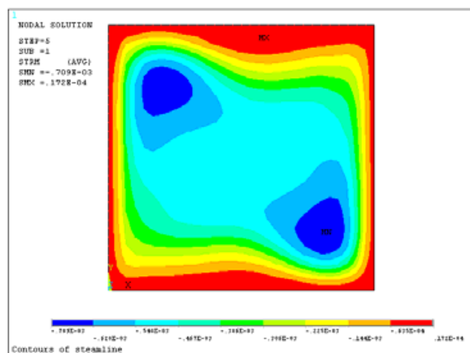



图 8-84 流线型等值线图

❼依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Device Options，会弹出“Device Options”对话框，如图 8-85 所示，单击“[/DEVI] Vector mode (wireframe)”后的方框，使“Off”状态变为“On”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会弹出“Change Title”对话框，在输入框中输入“Contours of velocity vectors”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Vector Plot→Predefined，会弹出“Vector Plot of Predefined Vectors”对话框，如图 8-86 所示，采用默认设置，单击“OK”按钮关闭对话框。ANSYS 显示窗口将显示如图 8-87 所示的速度矢量结果。

❿依次选择 Utility Menu→WorkPlane→WP Settings，会弹出“WP Settings”对话框，如图 8-88 所示，在“Snap Incr”后输入框中输入 0.0005，在“Spacing”输入框中输入

0.0001，在“Tolerance”输入框中输入 0.00005，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫依次选择 Utility Menu→Plot→Elements，显示所有单元。

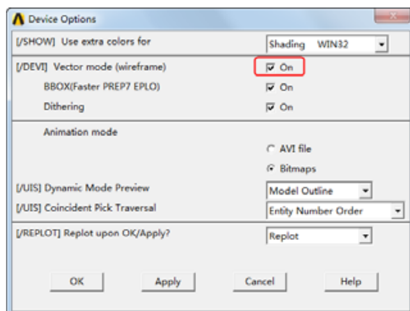



图 8-85 “Device Options”对话框

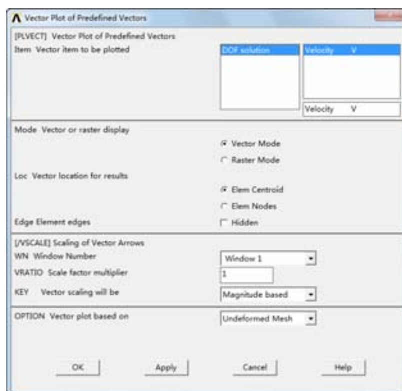



图 8-86 “Vector Plot of Predefined Vectors”对话框

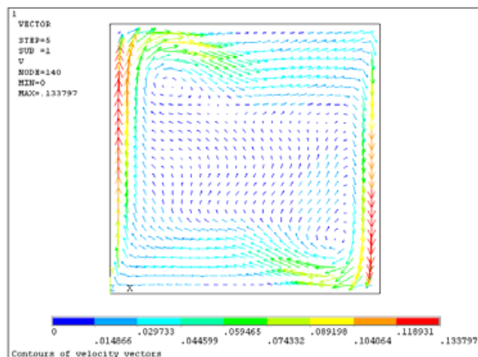



图 8-87 速度矢量结果显示

⓬依次选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Defi Trace Pt，会弹出“Define Trace Points”对话框，如图 8-89 所示，用鼠标在模型上单击 5 个点，定义轨迹显示点后的结果如图 8-90 所示。

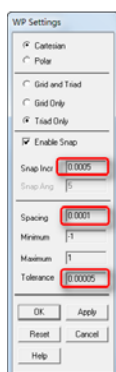



图 8-88 “WP Settings”对话框

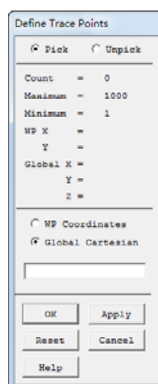



图 8-89 “Define Trace Points”对话框

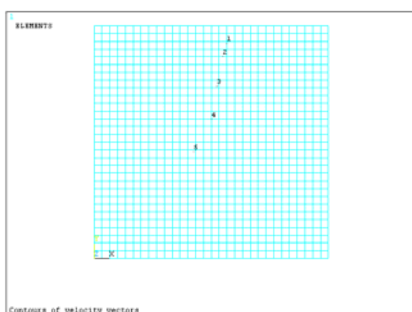



图 8-90 定义轨迹显示点结果显示

⓭依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会弹出“Change Title”对话框，在输入框中输入“Contours of temperature plotted by particle traces”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓮依次选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Plot Flow Tra，会弹出“Plot Flow Trace”对话框，如图 8-91 所示，在“Items to be contoured along trace”列表框中选择 DOF solution→Temperature TEMP，在“Numtr Valid trace point number”输入框中输入 5，在“Mxloop Max number of loops”输入框中输入 100，单击“OK”按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 8-92 所示的粒子轨迹显示的温度等值线图。

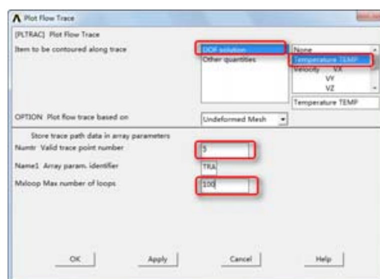



图 8-91 “Plot Flow Trace”对话框

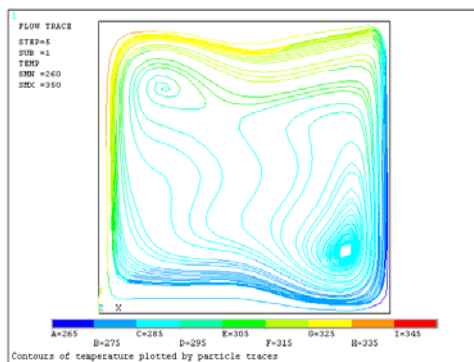


图 8-92 粒子轨迹显示的温度等值线图

⓯依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会弹出“Change Title”对话框，在输入框中输入“Contours of velocity plotted by particle traces”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓰依次选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Plot Flow Tra，会弹出“Plot Flow Trace”对话框，如图 8-91 所示，在“Items to be contoured along trace”列表框中选择选择 DOF solution→Velocity VSUM，在“Numtr Valid trace point number”输入框中输入 5，在“Mxloop Max number of loops”输入框中输入 100，单击“OK”按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 8-93 所示的粒子轨迹显示的速度等值线图。

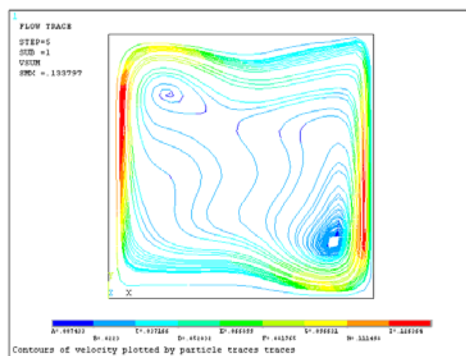


图 8-93 粒子轨迹显示的速度等值线图

## 8.5.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

# 第 9 章

# 动网格的 ALE 分析及实例

ALE 即拉格朗日-欧拉方程。流体流动问题往往涉及到动接触面，这种界面可能是可动的内壁，也可能是可动的外壁或自由界面，对于这种问题可以 ALE 法来求解。

本章中给出了三个具有代表性的详细分析实例。读者可通过实例的练习加深对 ALE 分析的理解。

学 习 要 点

- 了解 ALE 方法的基本概念
- 通过实例加深对 ALE 方法的理解

# 9.1 ALE 方法简介

连续介质力学中有两种经典的运动描述方法，描述有限元网格的运动时也采用这两种方法：

一种是拉格朗日（Lagrange）描述，网格节点固定在物质点上并随之运动，因此在描述运动边界或者运动界面时非常方便，但当物质发生大变形时常常使网格纠缠，轻则严重影响了单元的近似精度，重则使坐标变换中的 Jocobian 行列式的值等于零或者负数，从而使计算中止或者引起严重的局部误差。

另一种是欧拉（Euler）描述，网格节点固定在空间，始终不动，因此在描述大变形时没有纠缠问题，但也有两个缺点：一是网格和物质的相对运动使处理对流效应更加困难；二是无法精确确定运动边界或者运动界面的位置。为了克服拉格朗日描述和欧拉描述各自的缺点，Noh 和 Hirt 在研究有限差分法时提出了 ALE 描述法，后来又被 Hughes、Liu 和 Belytschko 等人引入到有限元法中来。其基本思想是：计算网格不再固定，也不依附于流体质点，而是可以相对于坐标系作任意运动。由于这种描述既包含 Lagrange 观点，可应用于带自由液面的流动，也保留了 Euler 观点，克服了纯 Lagrange 方法常见的网格畸变的不如意之处。自 20 世纪 80 年代中期以来，ALE 描述已被广泛用来研究带自由液面的流体晃动问题、固体材料的大变形问题、流固耦合问题等。

流体流动问题往往涉及到动接触界面。这种界面可能是可动的内壁，例如在流体中运动的物体。这种界面也可能是可动的外壁或自由界面。对于这种问题，流体区域随时间变化而变化，可动的有限元网格可以满足可动界面的边界条件。拉格朗日-欧拉方程（即 ALE）可以解决这类问题。

为了用 ALE 方法进行瞬态分析，必须利用 ALE 方程和瞬态运算法则。可以用以下方法激活 ALE 方程：

命令：FLDATAL，SOLU，ALE，TRUE

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Solution Options
Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Solution Options

可以用以下方法激活瞬态运算法则：

命令：FLDATAL，SOLU，TRAN，TRUE

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Setup→Solution Options
Main Menu→Solution→FLOTRAN Setup→Solution Options

进行 ALE 分析时，需要用到以下两种单元：

1）FLUID141，KEYOPT（3）=0（笛卡尔坐标），1（关于 Y 轴对称），2（关于 X 轴对称）；

2）FLUID142，KEYOPT（3）=0（笛卡尔坐标）。



ALE 分析不能用圆柱坐标。

可以用以下方法定义单元类型：

命令：ET，ITYPE，Ename，KOP1，KOP2，KOP3，KOP4，KOP5，KOP6

KEYOPT，ITYPE，KNUM，VALUE

菜单：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete

可以用以下的方法来设置节点上的位移或速度边界条件：

命令：D

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement（或 Velocity）→On Nodes

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement（或 Velocity）→On Nodes

可以用以下的方法来设置实体模型上的位移或速度边界条件：

命令：DL 和 DA

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement（或 Velocity）→On Lines

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement（或 Velocity）→On Lines

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement (或 Velocity)→On Areas

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement (或 Velocity)→On Areas

# 9.2 对称扭转 ALE 分析

## 9.2.1 问题描述

这个例子描述的是微机械电子装置（即 MEMS）的拉格朗日-欧拉（即 ALE）分析。该装置由两块刚性板和两板之间的粘性流体组成。最初，这块板是水平的，流体是静止的。顶部的板以很小的角振幅关于中心线振荡。确定移动板的转矩可以建立装置的降阶模型，模型示意图如图 9-1 所示。

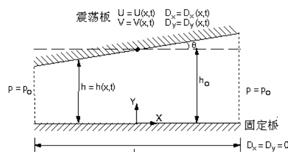



图 9-1 模型示意图

对于二维的不可压缩流动，如果忽略惯性，Navier - Stokes 方程可简化为 Reynolds 方程

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial x}\right)=6\mu\frac{\partial}{\partial x}\left(hU\right)+12\mu V$$

式中，$h$ 表示两板之间的距离；$U$ 和 $V$ 表示运动板的 X 和 Y 方向的速度分量。

假设顶部板的角位移很小，则

$$U \approx 0; \mathrm{V} \approx \mathrm{R}^{\theta}; R \approx x$$

将上面的数值代入 Reynolds 方程，并假设速度分量 $U$ 变化很小，则

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x}\right) = 12\mu V = 12\mu x\theta$$

通过上式可得到

$$p = 6\mu\theta \int \frac{x^2}{h^3} dx + \int \frac{C_1}{h^3} dx + C_2$$

对于较小的角位移，$h$ 可用 $h_0$ 来代替，即

$$p = \frac{6\mu\theta}{h_0^3}\left(\frac{x^3}{3}\right) + \frac{C_1 x}{h_0^3} + C_2$$

当 $x=\pm L/2$ 时，$p=p_0$，即

$$p_0 = \frac{2\mu\theta}{h_0^3}\left(\frac{L}{2}\right)^3 + \frac{C_1}{h_0^3}\left(\frac{L}{2}\right) + C_2$$

$$p_0 = -\frac{2\mu\theta}{h_0^3}\left(\frac{L}{2}\right)^3 - \frac{C_1}{h_0^3}\left(\frac{L}{2}\right) + C_2$$

求解上面两个方程可得到

$$C_2 = p_0$$

$$C_1 = -2\mu^{\theta}\left(L/2\right)^2$$

将各式带入 $p$ 中，得

$$p = p_0 + \frac{2\mu\theta}{h_0^3} x^3 - \frac{2\mu\theta}{h_0^3}\left(\frac{L}{2}\right)^2 x$$

即压力差为

$$\left(p - p_0\right) = \frac{2\mu\theta}{h_0^3} x \left\{ x^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2 \right\}$$

可得到力和力矩方程为

$$F_p = \int_{-L/2}^{L/2} (p - p_0) \mathrm{d}x = 0$$

$$M_p = \int_{-L/2}^{L/2} (p - p_0) x \mathrm{d}x = -\frac{1}{60} \frac{\mu \theta L^5}{h_0^3}$$

在 X 轴方向的流体速度场为

$$U(x,y,t) = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y(y-h)$$

因此，剪应力为

$$\mu \frac{\partial U}{\partial y}\bigg|_{y=h} = \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{h_0^2}\left[3x^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2\right]$$

由抗剪应力引起的力和力矩方程为

$$F_s = \int_{-L/2}^{L/2} \mu \frac{\partial U}{\partial y}\bigg|_{y=h} dx = 0$$

$$M_s = \int_{-L/2}^{L/2} \mu \frac{\partial U}{\partial y}\bigg|_{y=h} x dx = 0$$

## 9.2.2 前处理

**01 定义工作名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“Torsional Mirror”，并将“NEW log and error files？”设置为“Yes”，如图 9-2 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Torque Mirror Problem”，如图 9-3 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

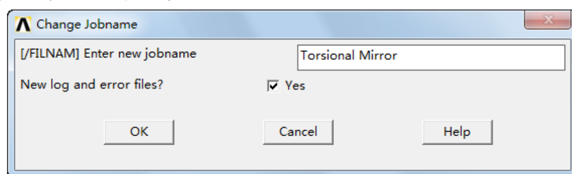



图 9-2 “Change Jobname”对话框

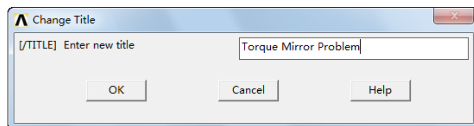



图 9-3 “Change Title”对话框

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences 命令，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 9-4 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，会弹出“Element Types”对话框，如图 9-5 所示。

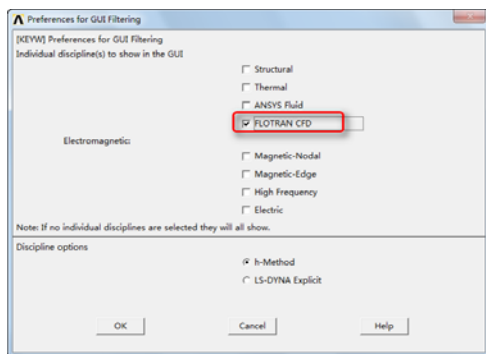


图 9-4 “Preferences for GUI Filtering”对话框

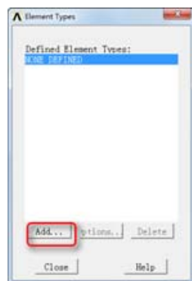


图 9-5 “Element Types”对话框

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 9-6 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

❹单击“Element Types”对话框中的“Options”按钮，会弹出“FLUID141 element type options”对话框，如图 9-7 所示，在“Support mesh disp. DOFS？ K4”选择列表中选择“Yes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

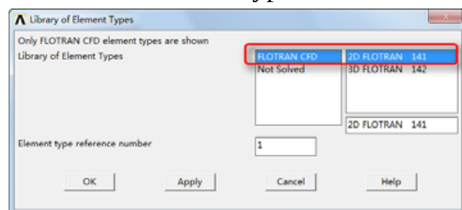


图 9-6 “Library of Element Types”对话框

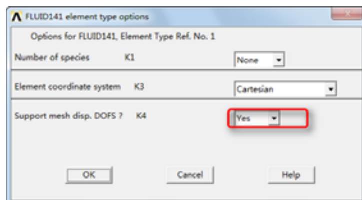


图 9-7 “FLUID141 element type options”对话框

**03** 建立几何模型。

❶依次选择 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，会弹出“Scalar Parameters”对话框，在“Select”输入框中依次输入：

```
LX = 1.0;
```

```
NDX = 40;
H = 0.01;
NDY = 10;
POUT = 0;
RHO = 1;
MU = 1;
nts = 40;
time = 10;
delta = time/nts;
appf = delta;
AMAX = (2*H/LX)/8;
OMEGA = 2*3.14159/time;
X0 = LX/2;
Y0 = H;
H0 = H。
```



每次输入完之后单击“Apply”按钮，全部输入完成之后单击“Close”按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit，会弹出“Array Parameters”对话框，如图 9-8 所示。

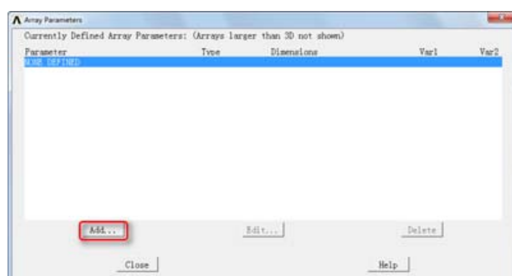



图 9-8 “Array Parameters”对话框

❸单击“Add”按钮，会弹出“Add New Array Parameter”对话框，如图 9-9 所示，在“Par Parameter name”输入框输入“UXTAB”，在“Type Parameter type”选择列表中选择“Table”，在“I，J，K No. of row，cols，planes”输入框中依次输入 6、4、1，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

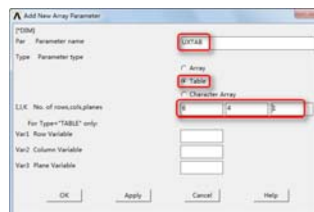



图 9-9 “Add New Array Parameter”对话框

❹单击“Array Parameters”对话框中的“Edit”按钮，会弹出“Table Array：UXTAB=f(Row，Column，Plane)”对话框，在输入框中的第一列从第二行开始依次输入-999、1、X0、AMAX、0、0，第二列依次输入 1、-1、0、1、27、2、17，第三列依次输入 0、-2、9、OMEGA、1、3、18，第四列依次输入 0、-3、10、1、-2、3、-1，第五列依次输入 0、99、0、1、-3、2、-1，如图 9-10 所示，单击 File→Apply 保存数据，单击 File→Quit 关闭该对话框。

❺单击如图 9-8 所示“Array Parameters”对话框中的“Add”按钮，会弹出“Add New Array Parameter”对话框，如图 9-9 所示，在“Par　Parameter name”输入框输入“UYTAB”，在“Type　Parameter type”选择列表中选择“Table”，在“I，J，K　No. of row，cols，planes”输入框中依次输入 6、3、1，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

图 9-10 “Table Array：UXTAB =f（Row，Column，Plane）”对话框

❻单击“Array Parameters”对话框中的“Edit”按钮，会弹出“Table Array：UXTAB=f(Row，Column，Plane)”对话框，在输入框中的第一列从第二行开始依次输入-999,、1、X0、AMAX、0、0，第二列依次输入 1、-1、0、1、27、2、17，第三列依次输入 0、-2、9、OMEGA、1、3、18，第四列依次输入 0、99、9、1、-2、3、-1，如图 9-11 所示，单击 File→Apply 保存数据，单击 File→Quit 关闭该对话框。

图 9-11 “Table Array：UXTAB =f（Row，Column，Plane）”对话框

❼单击如图 9-8 所示“Array Parameters”对话框中的“Add”按钮，会弹出“Add New Array Parameter”对话框，如图 9-9 所示，在“Par　Parameter name”输入框输入“UXTAB”，在“Type　Parameter type”选择列表中选择“Table”，在“I，J，K　No. of row，cols，planes”输入框中依次输入 6、5、1，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽单击“Array Parameters”对话框中的“Edit”按钮，会弹出“Table Array：

UXTAB=f(Row，Column，Plane)”对话框，在输入框中的第一列从第二行开始依次输入-999、1、X0、AMAX、OMEGA*AMAX、0，第二列依次输入 1、-1、0、-1、27，1　，17，第三列依次输入 0、-2、9、OMEGA、1、3、18，第四列依次输入 0、-3、10、OMEGA、1、3 、19，第五列依次输入 0、-4、9、1、-2、3、-1，第六列依次输入 0、99、0、1、-4、3，-3，如图 9-12 所示，单击 File→Apply 保存数据，单击 File→Quit 关闭该对话框。

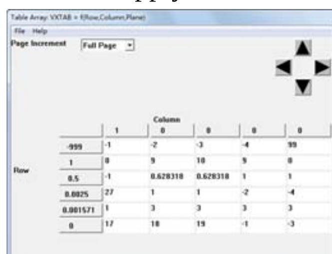



图 9-12 Table Array：UXTAB =f（Row，Column，Plane）对话框

❾单击如图 9-8 所示“Array Parameters”对话框中的“Add”按钮，会弹出“Add New Array Parameter”对话框，如图 9-9 所示，在“Par　Parameter name”输入框输入“VYTAB”，在“Type　Parameter type”选择列表中选择“Table”，在“I，J，K　No. of row，cols，planes”输入框中依次输入 6、5、1，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❿单击“Array Parameters”对话框中的“Edit”按钮，会弹出“Table Array：UXTAB=f(Row，Column，Plane)”对话框，在输入框中的第一列从第二行开始依次输入-999、1、X0、AMAX、OMEGA*AMAX、0，第二列依次输入 1、-1、0、 1、27、2、17，第三列依次输入 0、,-2、9、OMEGA、1、3、18，第四列依次输入 0、-3、10、OMEGA、1、3、19，第五列依次输入 0、-4、10、1、-2、3，-1，第六列依次输入 0、99、0、1、-4、3，-3，如图 9-13 所示，单击 File→Apply 保存数据，单击 File→Quit 关闭该对话框。

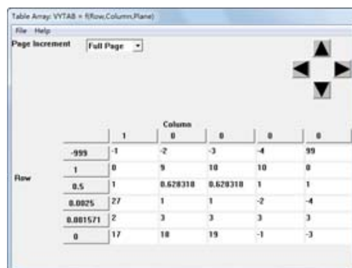



图 9-13 “Table Array：UXTAB =f（Row，Column，Plane）”对话框

⓫依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 9-14 所示，在“X1，X2　X-coordinates”输入框中依次输入 0，LX，在“Y1，Y2　Y-coordinates”输入框中依次输入 0，H，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓬依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，选择“Line　Line numbers”，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默

认设置，如图 9-15 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓭依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video 命令，ANSYS 显示窗口将变成白色。依次选择 Utility Menu→Plot→Areas 将显示所生成的几何模型，生成的几何模型如图 9-16 所示。

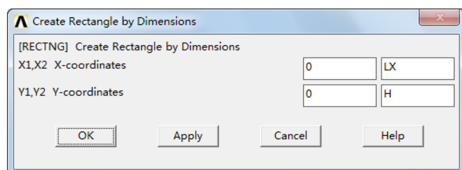



图 9-14 “Create Rectangle by Dimensions”对话框




图 9-15 “Plot Numbering Controls”对话框

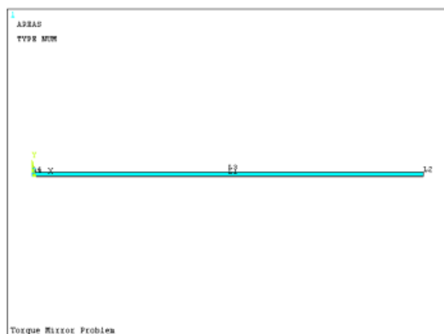



图 9-16 生成的几何模型

⓮单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**04 划分网格。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on…”对话框，用鼠标选择线段 L1、L3。

❹单击“OK”按钮会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 9-17 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 NDX。

❺单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Size on…”对话框，用鼠标选择线段 L2、L4。

❻单击“OK”按钮会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 9-17 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 NDY，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入-10, 单击“OK”按钮。

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided，会弹出“Mesh Areas”对话框，单击“Pick All”按钮，划分的网格模型如图 9-18 所示。

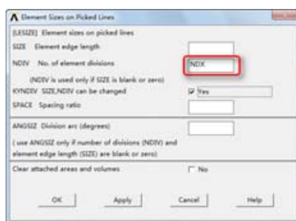


图 9-17 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

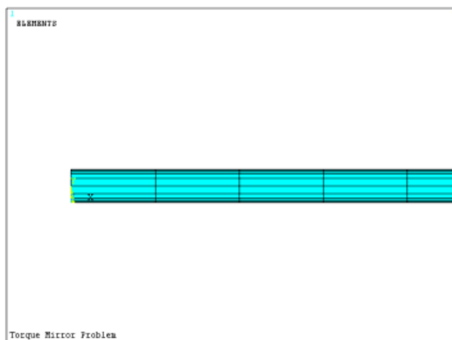



图 9-18 划分网格后的模型（局部）

❽单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**05 定义边界条件。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 9-19 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L3，单击“OK”按钮关闭对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 9-20 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。




图 9-19 “Select Entities”对话框




图 9-20 “Select Entities”对话框

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 9-21 所示。

❻“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“Apply VX load as a”的选择列表中选择“Existing table”，在“Apply VY load as a”的选择列表中选择“Existing table”，其余采用默认设置。

❼单击“OK”按钮，会弹出“Apply VELO on nodes”对话框，如图 9-22 所示，选择列表中的“VXTAB”。

❽单击“Apply”按钮，会弹出“Return box”对话框，单击“Use the same selection again？”后的方框，如图 9-23 所示，使“No”状态变为“Yes”。

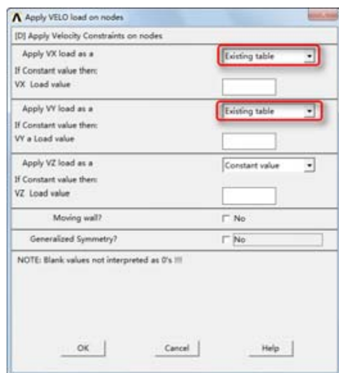


图 9-21 “Apply VELO load on Nodes”对话框

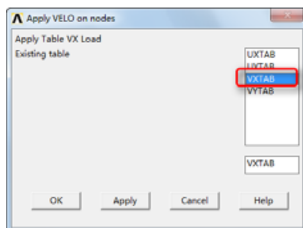


图 9-22 “Apply VELO on nodes”对话框

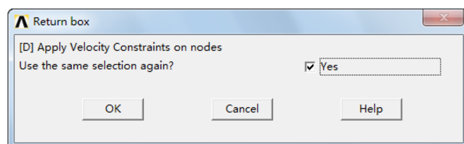



图 9-23 “Return box”对话框

❾单击“OK”按钮，会弹出“Apply VELO Tabular Loads on nodes”对话框，如图 9-24 所示。

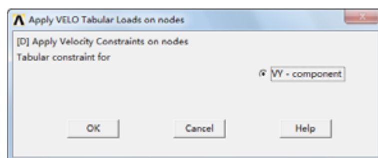


图 9-24 “Apply VELO Tabular Loads on nodes”对话框

❿单击“OK”按钮，会再次弹出“Apply VELO on nodes”对话框，选择列表中的“VYTAB”，单击“OK”按钮会再次弹出“Return box”对话框，单击“Use the same selection again？”后的方框，使“Yes”状态变为“No”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→

Displacement→On Nodes，会弹出“Apply U on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply DISP load on nodes”对话框，如图 9-25 所示。

⑫“Apply DISP load on nodes”对话框中，在“Apply UX load as a”的选择列表中选择“Existing table”，在“Apply UY load as a”的选择列表中选择“Existing table”。

⑬单击“OK”按钮，会弹出“Apply DISP on nodes”对话框，如图 9-26 所示，选择列表中的“UXTAB”。

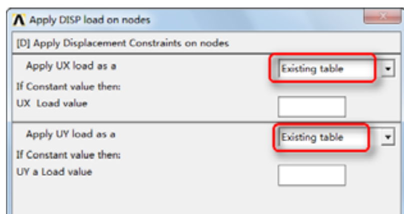



图 9-25 “Apply DISP load on nodes”对话框

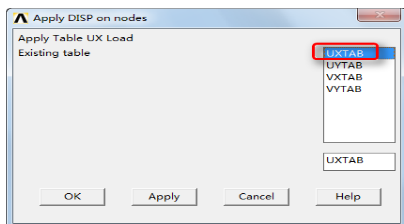



图 9-26 “Apply DISP on nodes”对话框

⑭单击“Apply”按钮，会弹出“Return box”对话框，单击“Use the same selection again？”后的方框，如图 9-23 所示，使“No”状态变为“Yes”。

⑮单击“OK”按钮，会弹出“Apply DISP Tabular Loads on nodes”对话框，如图 9-27 所示。

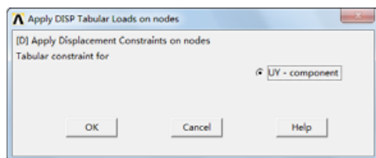



图 9-27 “Apply DISP Tabular Loads on nodes”对话框

⑯单击“OK”按钮，会再次弹出“Apply DISP on nodes”对话框，选择列表中的“UYTAB”，单击“OK”按钮会再次弹出“Return box”对话框，单击“Use the same selection again？”后的方框，使“Yes”状态变为“No”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑰依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 9-19 所示。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L2、L4，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑱依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 9-20 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑲依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Nodes，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框，如图 9-28 所示，在“PRES Pressure value”输入框输入 POUT，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑳依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图

9-19 所示。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L1，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉑依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 9-20 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉒依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement→On Nodes，会弹出“Apply U on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply DISP load on nodes”对话框，如图 9-29 所示。

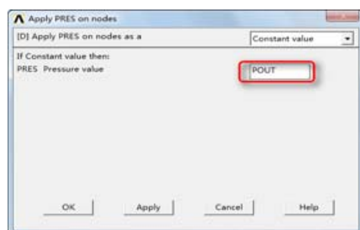



图 9-28 “Apply PRES on nodes”对话框

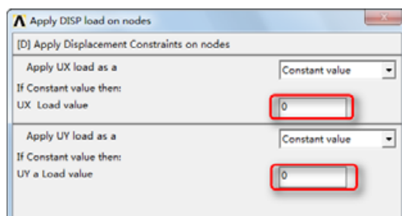



图 9-29 “Apply DISP load on nodes”对话框

㉓“Apply DISP load on nodes”对话框中，在“UX Load value”输入框中输入 0，在“UY a Load value”输入框中输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框，如图 9-21 所示。

㉔依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 9-21 所示。

㉕“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“Apply VX load as a”的选择列表中选择“Constant Value”，在“VX Load value”输入框输入 0，在“Apply VY load as a”的选择列表中选择“Constant Value”，在“VY a Load value”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉖加载后的几何模型如图 9-30 所示。

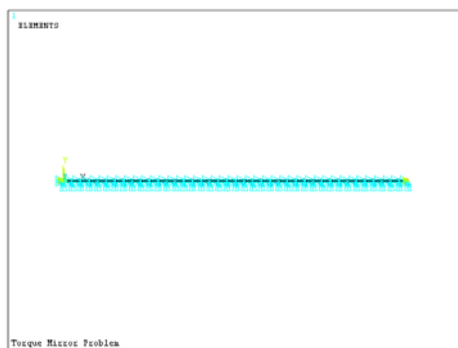



图 9-30 加载后的几何模型

### 9.2.3 求解

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 9-31 所示，采用默认设置。

❸单击“OK”按钮会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 9-32 所示，在“Density property type　CONSTANT　Constant value”输入框中输入 RHO，在“Viscosity property type CONSTANT　Constant value”输入框中输入 MU，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。



图 9-31 “Fluid Properties”对话框

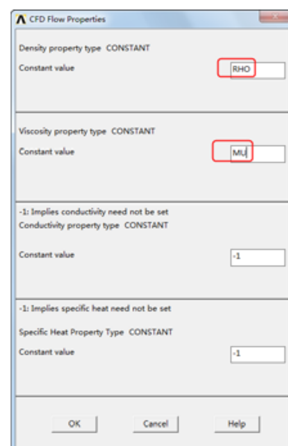


图 9-32 “CFD Flow Properties”对话框

❹依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Additional Out→RFL Out Derived，会弹出“RFL Output Derived”对话框，如图 9-33 所示，单击“TAUW　Output wall shear stress？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Mod Res/Quad Ord→CFD Quad Orders，会弹出“Quadrature Orders”对话框，如图 9-34 所示，在“MOMD　Momentum diffusion”输入框输入 2，在“MOMS　Momentum source”输入框输入 2，在“PRSD Pressure diffusion”输入框输入 2，在“PRSS　Pressure source”输入框输入 2，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

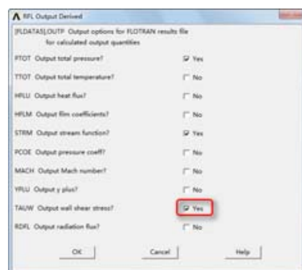


图 9-33 “RFL Output Derived”对话框

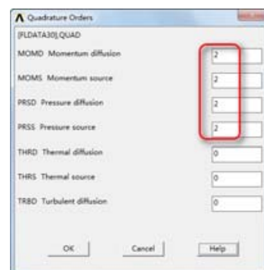


图 9-34 “Quadrature Orders”对话框

❻依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 9-35 所示，在“TRAN Steady state or transient？”选择列表中选择“Transient”；单击“FLOW Solve flow equations？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”；在“TURB Laminar or turbulent？”选择列表中选择“Laminar”；单击“ALE Allow mesh motion？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

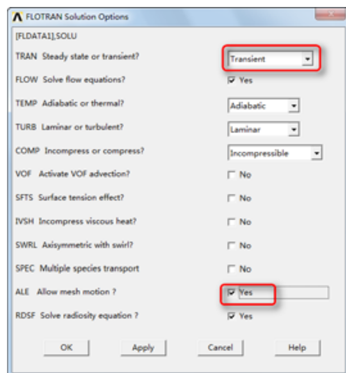



图 9-35 “FLOTRAN Solution Options”对话框

❼依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Time Step Controls”对话框，如图 9-36 所示，在“STEP Select time step control”后的选择列表选择“User defined”，在“Base output control on”后的选择列表中选择“Both”。

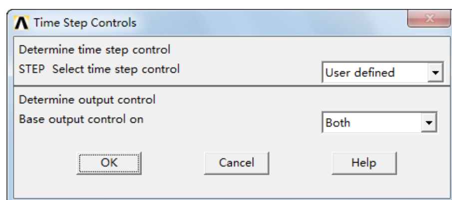



图 9-36 “Time Step Controls”对话框

❽单击“OK”按钮会弹出“Transient Controls”对话框，如图 9-37 所示，在“STEP User-defined time step”输入框输入 delta，在“NUMB Number of time steps”输入框输入 nts，在“TEND Stop time”输入框输入 time，在“GLOB Global iter per time step”输入框输入 25，在“STEP，APPE Number of time steps”输入框输入 appf，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。




“STEP，APPE Number of time steps”输入框在对话框下面，需要拖动对话框右边的拉条才能看到。

❾依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 9-38 所示。

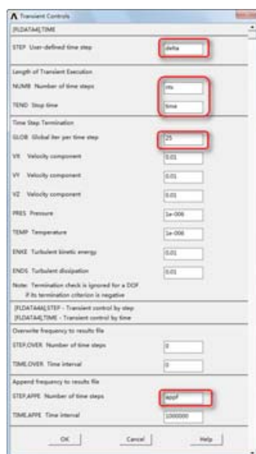


图 9-37 “Transient Controls”对话框

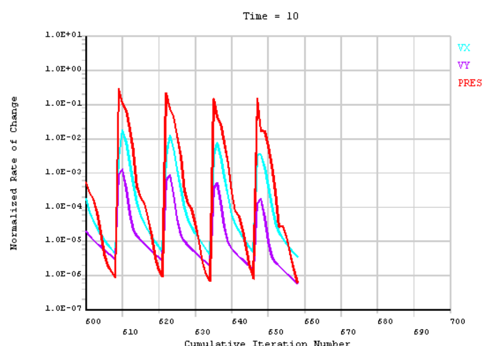



图 9-38 迭代曲线

## 9.2.4 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

❷依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 9-39 所示。

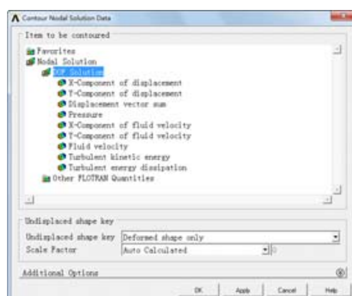



图 9-39 “Contour Nodal Solution Data”对话框

❸在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Pressure，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 9-40 所示的压力场分布等值线图。

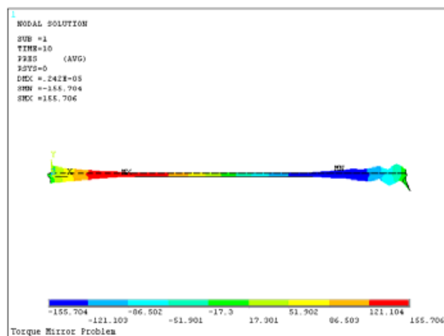



图 9-40 压力场分布等值线图

❹在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Fluid velocity，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 9-41 所示的速度场分布等值线图。

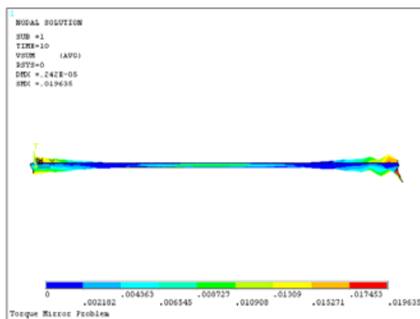


图 9-41  速度场分布等值线图

❺在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Displacement vector sum，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 9-42 所示的位移场分布等值线图。

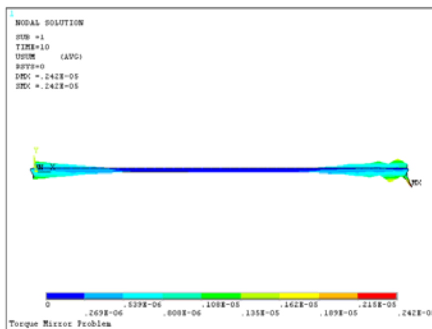


图 9-42  位移场分布等值线图

❻依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Animate→Over Results，会弹出“Animate Over Results”对话框，如图 9-43 所示，在“Model result data”选择框中选择“Result Set Range”，在“Display Type”选择列表中选择 VOF data→Volume fraction，其余采用默认设置。

❼单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示板的位移随时间变化动画和“Animation Co…”调节对话框，如图 9-44 所示，调节对话框可以控制液面变化的速度，单击“Close”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Animate→Over Time，会弹出“Animate Over Results”对话框，如图 9-43 所示，在“Model result data”选择框中选择“Time Range”，在“Range Minimum，Maximum”输入框中依次输入 0、10，在“Animation time delay(sec)”输入框中输入 0.2，在“Display Type”选择列表中选择 DOF solution→Velocity VSUM，其余采用默认设置。

❾单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示板的速度随时间变化动画和“Animation Co…”调节对话框，如图 9-44 所示，调节对话框可以控制液面变化的速度，单击“Close”按钮关闭该对话框。

❿依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Deformed Shape，会弹出

“Plot Deformed Shape”对话框，如图 9-45 所示，在“KUND　Items to be plotted”选择列表中选择“Def shape only”。

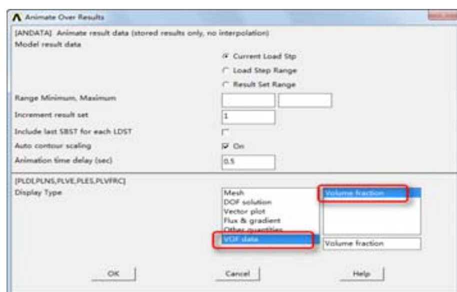


图 9-43 “Animate Over Results”对话框

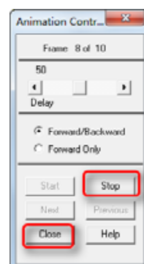


图 9-44 调节对话框

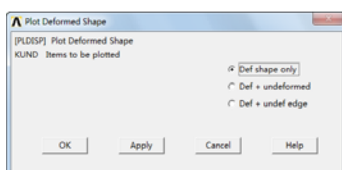


图 9-45 “Plot Deformed Shape”对话框

⓫单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 9-46 所示的 25s 时的网格模型。

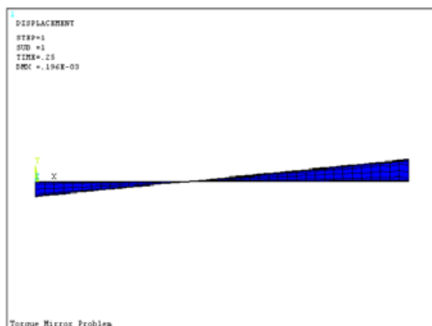


图 9-46 25s 时的网格模型

### 9.2.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

## 9.3 容积可变式容器的 ALE/VOF 分析

### 9.3.1 问题描述

这个问题描述的是在一个一半充满了液体正方形容器中，当时间 *t*=0 时左边的壁开始向右移动，0.25s 之后左边的壁停止移动，流动的液体也逐渐平静下来，这个过程的总时间是 2s。模型结构及容积变化示意图如图 9-47 所示。

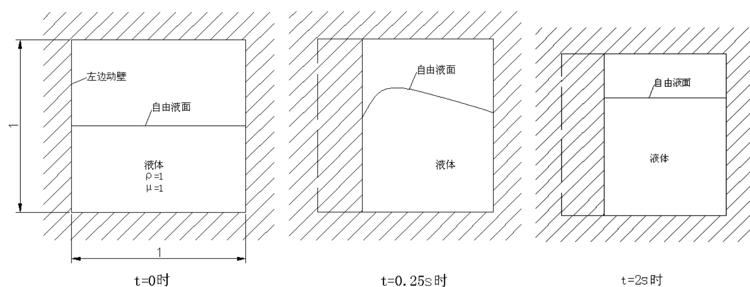



图 9-47 模型结构及容积变化示意图

左边壁的位移和速度的变化如图 9-48 所示，这个例子利用 VOF 方法和 ALE 方程协同分析。

## 9.3.2 前处理

### 01 定义工作名和工作标题.

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“Moving Wall”，并将“NEW log and error files？”设置为“Yes”，如图 9-49 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

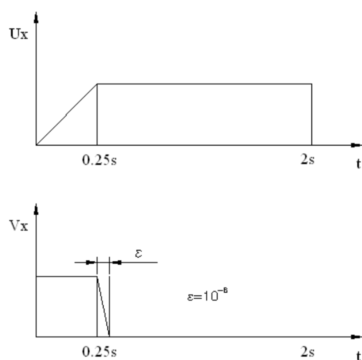



图 9-48 左边壁的位移和速度的变化曲线

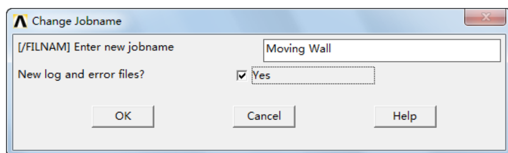



图 9-49 “Change Jobname”对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“ALE-VOF combination-container with moving wall & free surface”，如图 9-50 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

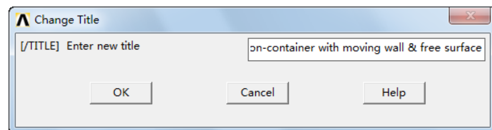



图 9-50 “Change Title”对话框

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 9-51 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

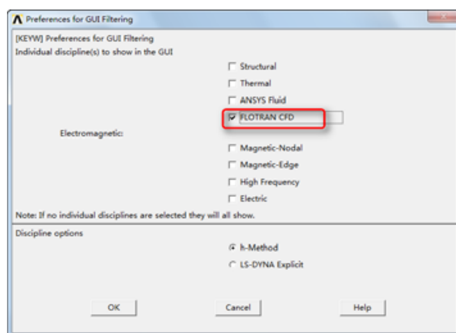


图 9-51 “Preferences for GUI Filtering”对话框

**02** 定义单元类型。

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，会弹出“Element Types”对话框，如图 9-52 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 9-53 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

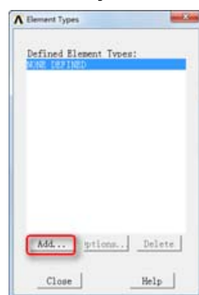


图 9-52 “Element Types”对话框

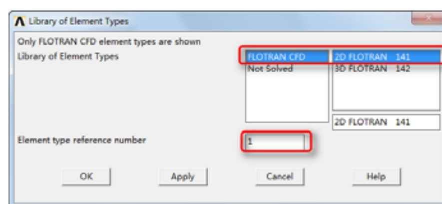


图 9-53 “Library of Element Types”对话框

❹单击“Element Types”对话框“Options”按钮，会弹出“FLUID141 element typeoptions”对话框，如图 9-54 所示，在“Element coordinate system K4”选择列表中选择“Yes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

**03** 建立几何模型。

❶依次选择 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，会弹出“Scalar Parameters”对话框，如图 9-55 所示。在“Select”输入框中依次输入：

```
LX = 1.0;
NDX = 10;
H = 1.0;
NDY = 10;
RHO = 1.0;
MU = 1.00;
```

```
LXF = 0.750;
time = 2;
nts = 200;
delta = time/nts;
appf = delta;
VEL = (LX-LXF)/(0.125*time)。
```

每次输入完之后单击“Apply”按钮，全部输入完成之后单击“Close”按钮关闭该对话框。

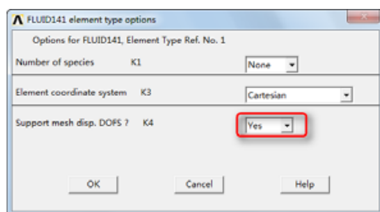


图 9-54 “FLUID141 element type options”对话框

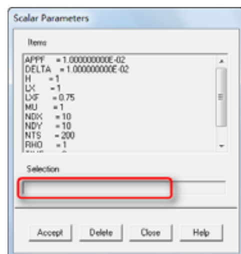


图 9-55 “Scalar Parameters”对话框

❷依次选择 Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit，会弹出“Array Parameters”对话框，如图 9-56 所示。

❸单击“Add”按钮，会弹出“Add New Array Parameter”对话框，如图 9-57 所示，在“Par Parameter name”输入框输入“timutab”，在“Type　Parameter type”选择列表中选择“Table”，在“I，J，K　No. of row，cols，planes”第一个输入框中输入 3，在“Var1 Row Variable”输入框中输入“time”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

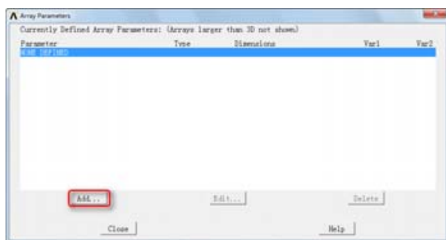


图 9-56 “Array Parameters”对话框

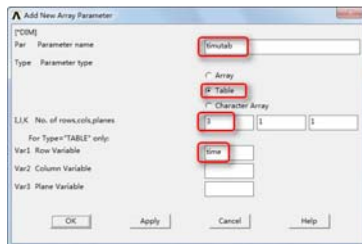


图 9-57 “Add New Array Parameter”对话框

❹单击“Array Parameters”对话框中的“Edit”按钮，会弹出“Table Array：TIMUTAB=f(TIME)”对话框，在“TIMT”输入框中的第一列依次输入 0、0.125*time、time，第二列从第二行开始依次输入 0、(LX-LXF)、(LX-LXF)，如图 9-58 所示，单击 File→Apply 保存数据，单击 File→Quit 关闭该对话框。

❺单击如图 9-56 所示“Array Parameters”对话框中的“Add”按钮，会弹出“Add New Array Parameter”对话框，如图 9-57 所示，在“Par　Parameter name”输入框输入“timvtab”，在“Type　Parameter type”选择列表中选择“Table”，在“I，J，K　No. of row，cols，

planes”第一个输入框中输入 4，在“Var1　Row Variable”输入框中输入“time”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻单击“Array Parameters”对话框中的“Edit”按钮，会弹出“Table Array：TIMUTAB=f(TIME)”对话框，在“TIMT”输入框中的第一列依次输入 0、0.125*time、0.125*time+0.000001、time，第二列从第二行开始依次输入 VEL、VEL、1e-12、1e-12，如图 9-59 所示，单击 File→Apply 保存数据，单击 File→Quit 关闭该对话框。

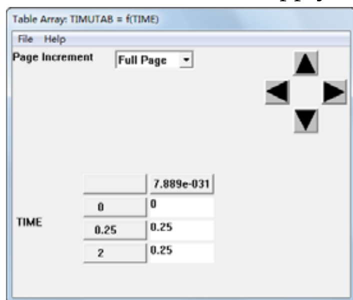


图 9-58 Table Array：TIMUTAB=f（TIME）对话框

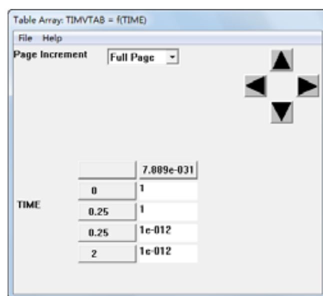


图 9-59 Table Array：TIMUTAB=f（TIME）对话框

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 9-60 所示，在“X1，X2　X-coordinates”输入框中依次输入 0，LX，在“Y1，Y2　Y-coordinates”输入框中依次输入 0，H，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，选择“LINE　Line numbers”，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，如图 9-61 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

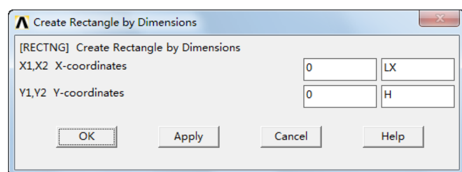


图 9-60 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

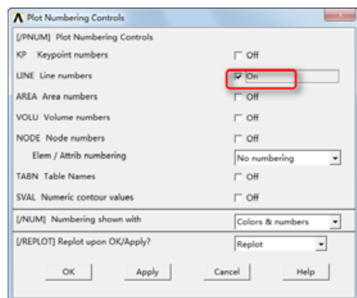


图 9-61 “Plot Numbering Controls”对话框

❾依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗口将变成白色。依次选择 Utility Menu→Plot→Areas 将显示所生成的几何模型，生成的几何模型如图 9-62 所示。

❿单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**04** 划分网格。

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines

→Picked Lines，会弹出“Element Size on…”对话框，用鼠标选择线段 L1、L3。

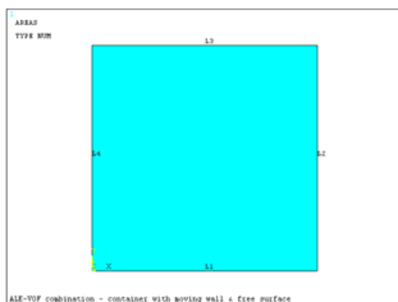



图 9-62 生成的几何模型

❹单击“OK”按钮会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 9-63 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 NDX，在“SPACE Spacing ratio”输入框中输入-10。

❺单击“Apply”按钮，会再次弹出“Element Size on…”对话框，用鼠标选择线段 L2、L4。

❻单击“OK”按钮会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 9-63 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框中输入 NDY，单击“OK”按钮关闭该对话框。

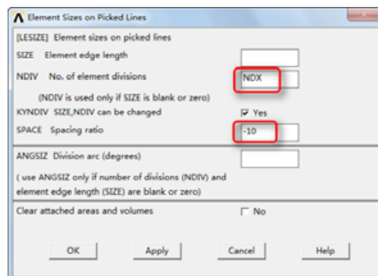



图 9-63 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided，会弹出“Mesh Areas”对话框，单击“Pick All”按钮，划分的网格模型如图 9-64 所示。

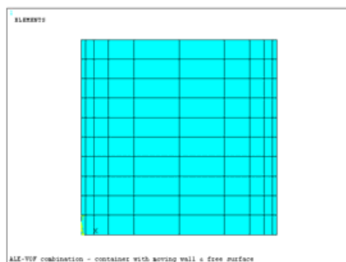



图 9-64 划分网格后的模型

❽单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**05 定义边界条件。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 9-65 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L4，单击“OK”按钮关闭对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 9-66 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

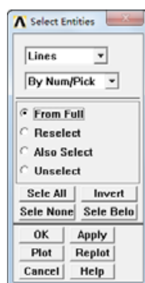



图 9-65 “Select Entities”对话框

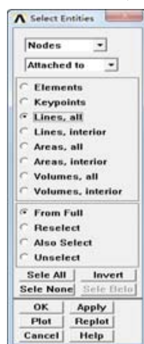
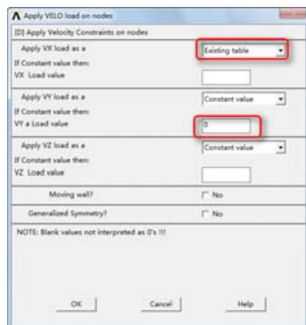



图 9-66 “Select Entities”对话框

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 9-67 所示。

❻“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“Apply VX load as a”的选择列表中选择“Existing table”，在“VY a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置。

❼单击“OK”按钮，会弹出“Apply VELO on nodes”对话框，如图 9-68 所示，选择列表中的“TIMUTAB”，单击“OK”按钮关闭该对话框。



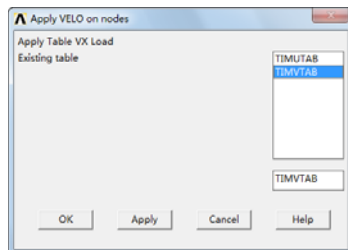




图 9-67 “Apply VELO load on Nodes”对话框

图 9-68 “Apply VELO on nodes”对话框

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→

Turbulence→On Nodes，会弹出“Apply Turb on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply TURB load on nodes”对话框，如图 9-69 所示，在“ENKE Load value”输入框中输入-1，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement→On Nodes，会弹出“Apply U on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply DISP load on nodes”对话框，如图 9-70 所示。

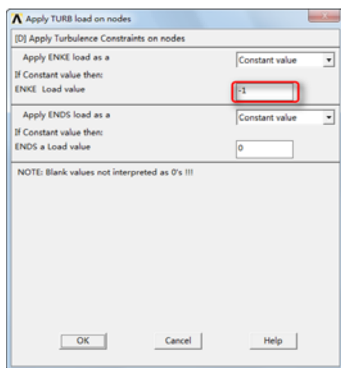


图 9-69 Apply TURB load on nodes 对话框

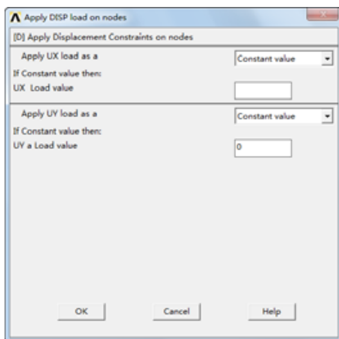


图 9-70 “Apply DISP load on nodes”对话框

❿“Apply DISP load on nodes”对话框中，在“Apply UX load as a”的选择列表中选择“Existing table”，在“UY a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置。

⓫单击“OK”按钮，会弹出“Apply DISP on nodes”对话框，如图 9-71 所示，选择列表中的“TIMUTAB”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

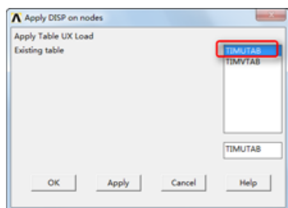


图 9-71 “Apply DISP on nodes”对话框

⓬依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 9-65 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L1、L3，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓭依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 9-66 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓮依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 9-67 所示。

⓯“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VX Load value”输入框中输入 0，

在“VY　a Load value”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑯依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 9-65 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L2，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑰依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 9-66 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑱依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 9-68 所示。

⑲“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VX　Load value”输入框中输入 0，在“VY　a Load value”输入框中输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement→On Nodes，会弹出“Apply U on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply DISP load on nodes”对话框，如图 9-71 所示。

㉑“Apply DISP load on nodes”对话框中，在“UX　a Load value”输入框输入 0，在“UY　a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉒依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 9-72 所示。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，0.5*H，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉓依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 9-73 所示，在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个选框中选择“Node，all”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉔依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Volume Fract→Init Loads→On Elements，会弹出“Apply VFRC on Elems”对话框。

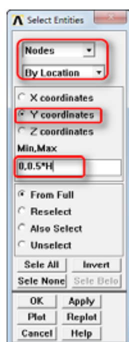



图 9-72 “Select Entities”对话框

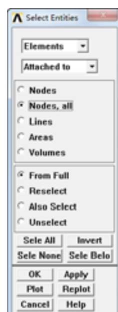



图 9-73 “Select Entities”对话框

㉕单击“Pick All”按钮，会弹出“Initialize VFRC on Elems”对话框，如图 9-74 所示，在“VFRC”输入框中输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

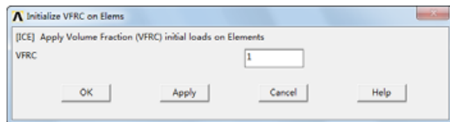



图 9-74 “Initialize VFRC on Elems”对话框

㉖加载后的几何模型如图 9-75 所示。

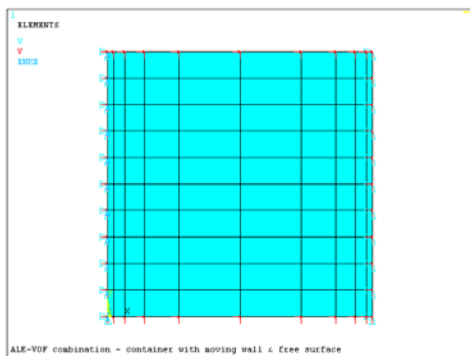



图 9-75 加载后的几何模型

## 9.3.3 求解

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 9-76 所示，采用默认设置。

❸单击“OK”按钮会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 9-77 所示，在“Density property type CONSTANT Constant value”输入框中输入 RHO，在“Viscosity property type CONSTANT Constant value”输入框中输入 MU，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。



图 9-76 “Fluid Properties”对话框



图 9-77 “CFD Flow Properties”对话框

❹依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Gravity，会弹出“Gravity Specification”对话框，如图 9-78 所示，在“ACELY　Accel in Y direction”输入框输入 9.8，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options 命令，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 9-79 所示，在“TRAN　Steady state or transient？”选择列表中选择“Transient”，单击“VOF　Activate VOF advection？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，单击“ALE　Allow mesh motion？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

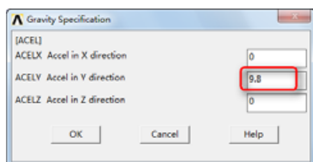



图 9-78 “Gravity Specification”对话框

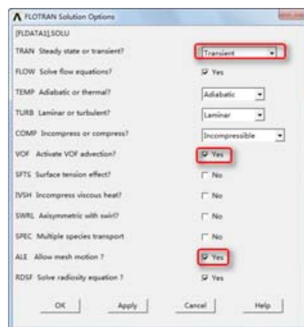



图 9-79 “FLOTRAN Solution Options”对话框

❻依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Time Step Controls”对话框，如图 9-80 所示，在“STEP　Select time step control”后的选择列表选择“User defined”，在“Base　output control on”后的选择列表中选择“Both”。

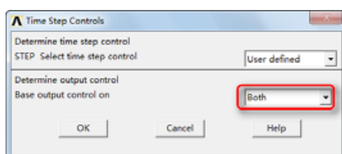



图 9-80 “Time Step Controls”对话框

❼单击“OK”按钮会弹出“Transient Controls”对话框，如图 9-81 所示，在“STEP User-defined time step”输入框输入“delta”，在“NUMB　Number of time steps”输入框输入“nts”，在“TEND　Stop time”输入框输入“time”，在“GLOB　Global iter per time step”输入框输入 25，在“STEP，APPE　Number of time steps”输入框输入“appf”，在“STEP，SUMF　Number of time steps”输入框输入 1，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。




“STEP，APPE　Number of time steps”和“STEP，SUMF　Number of time steps”输入框在对话框下面，需要拖动对话框右边的拉条才能看到。

❽依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 9-82 所示。

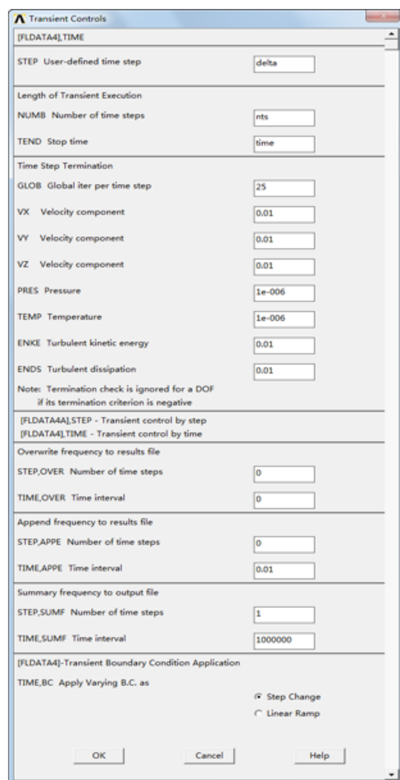



图 9-81 “Transient Controls”对话框

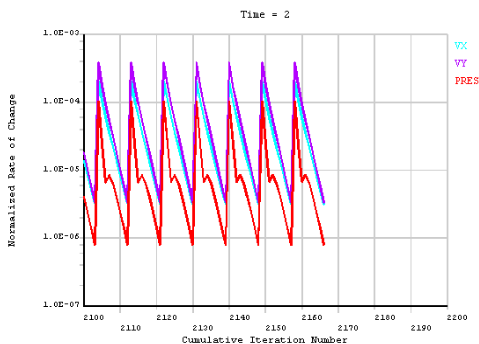



图 9-82 迭代曲线

## 9.3.4 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

❷依次选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Volume Fraction，ANSYS 窗口将显示如图 9-83 所示的液面的变化。

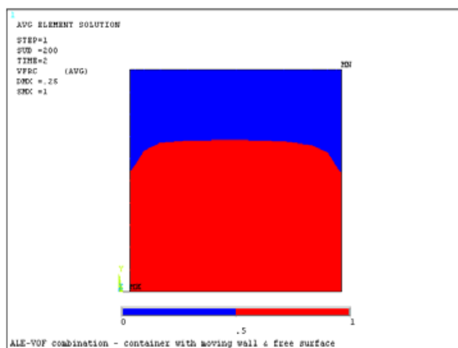



图 9-83 流体液面形状

❸依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal

Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 9-84 所示。

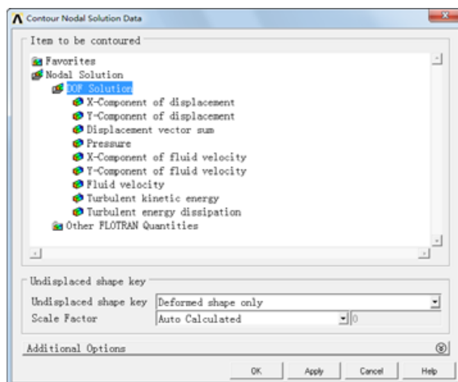



图 9-84 “Contour Nodal Solution Data”对话框

❹在“Item to be contoured”列表框中单击选择 DOF Solution→Pressure，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 9-85 所示的压力场分布等值线图。

❺在“Item to be contoured”列表框中单击选择 DOF Solution→Fluid velocity，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 9-86 所示的速度场分布等值线图。

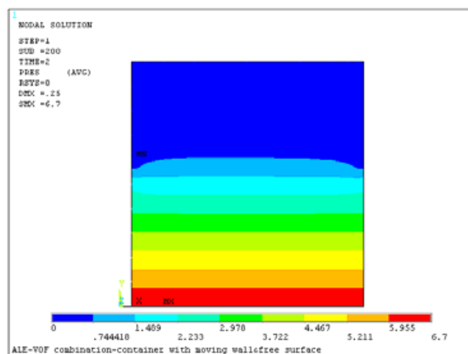



图 9-85 压力场分布等值线图

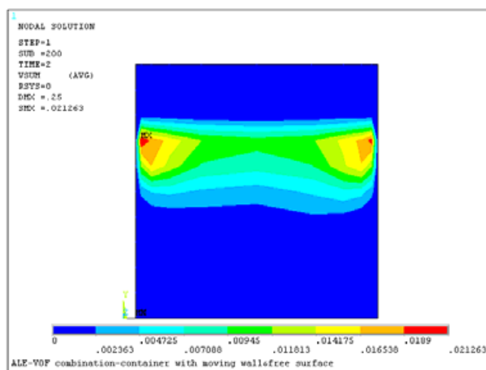



图 9-86 速度场分布等值线

### 9.3.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

## 9.4 动圆柱的 ALE 分析

### 9.4.1 问题描述

这个例子描述的是一个圆柱以恒定速度通过矩形区域的问题。流体建模时采用 FLUID141 三角形单元，利用 ALE 方程仿真模拟。表 9-1 表示的是单元属性的命令。

表 9-1 单元属性的命令

| 单元属性 | 命令 |
|---|---|
| 高宽比 | FLDATA39, REMESH, ARMA, 5.0 |
| 单元大小的变化 | FLDATA39, REMESH, VOCH, 3.0 |
| 高宽比的变化 | FLDATA39, REMESH, ARCH, 3.0 |

矩形区域模型如图 9-87 所示，圆柱的半径为 2.5mm，左边边界条件为 UX=0、UY=0、VX=0、VY=0，右边边界条件为 UX=0、UY=0、P=0，上边边界条件为 UX=0、UY=0、VY=0，下边边界条件为 UX=0、UY=0、VY=0，圆柱的速度和位移为 VX=1、UX=t，矩形区域内的流体密度为 1，粘度为 1。




图 9-87 模型示意图

### 9.4.2 前处理

**01 定义工作名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“Cylinder”，并将“NEW log and error files？”设置为“Yes”，如图 9-88 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

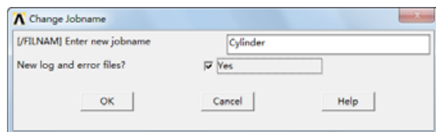



图 9-88 “Change Jobname”对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”

对话框，在对话框中输入工作标题“Cylinder pass through a channel”，如图 9-89 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 9-90 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

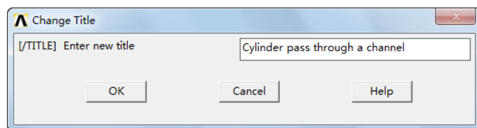



图 9-89 “Change Title”对话框

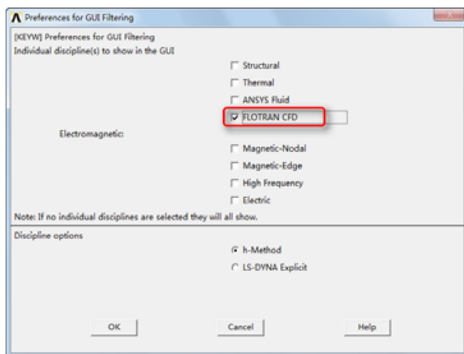



图 9-90 “Preferences for GUI Filtering”对话框

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit Delete，会弹出“Element Types”对话框，如图 9-91 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 9-92 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

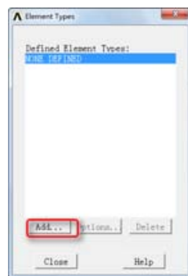



图 9-91 “Element Types”对话框

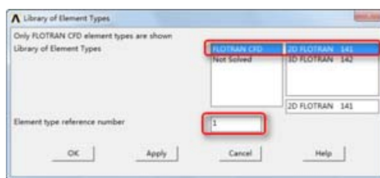



图 9-92 “Library of Element Types”对话框

❹单击“Element Types”对话框“Options”按钮，会弹出“FLUID141 element type options”对话框，如图 9-93 所示，在“Support mesh disp. DOFS？　K4”选择列表中选择“Yes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺单击“Element Types”对话框中的“Add”按钮，会再次弹出“Library of Element Types”对话框。

❻在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 2，单击“OK”按钮关闭“Library

of Element Types”对话框。

❼单击“Element Types”对话框“Options”按钮，会弹出“FLUID141 element type options”对话框，如图 9-93 所示，在“Support mesh disp. DOFS？　K4”选择列表中选择“Yes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽单击“Element Types”对话框中的“Add”按钮，会再次弹出“Library of Element Types”对话框。

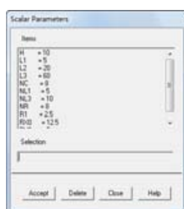
❾在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 3，单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

❿单击“Element Types”对话框“Options”按钮，会弹出“FLUID141 element type options”对话框，如图 9-93 所示，在“Support mesh disp. DOFS？　K4”选择列表中选择“Yes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

03 建立几何模型。

❶依次选择 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，会弹出“Scalar Parameters”对话框，如图 9-94 所示。在“Select”输入框中依次输入：



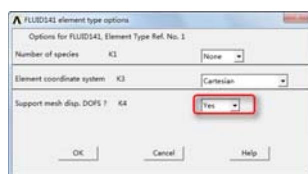




图 9-93 “FLUID141 element type options”对话框　　图 9-94 “Scalar Parameters”对话框

```
r1=2.5;
L1=5;
L2=20;
L3=60;
h=10;
rx0=l1+(l2-l1)/2;
ry0=h/2;
nl1=5;
nl3=10;
nr=8;
nc=8。
```




每次输入完之后单击“Apply”按钮，全部输入完成之后单击“Close”按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit，会弹出“Array Parameters”对话框，如图 9-95 所示。

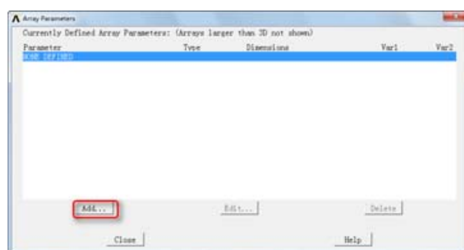


图 9-95 “Array Parameters”对话框

❸单击“Add”按钮，会弹出“Add New Array Parameter”对话框，如图 9-96 所示，在“Par　Parameter name”输入框输入“DIS”，在“Type　Parameter type”选择列表中选择“Table”，在“I，J，K　No. of row，cols，planes”前两个输入框中输入 6 和 3，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❹单击“Array Parameters”对话框中的“Edit”按钮，会弹出“Table Array: DIS =f(Row，Column，Plane)”对话框，在输入框中的第一列从第二行开始依次输入-999、0、1、0、0、0，第二列依次输入 1、-1、0、1、17、3、1，第三列依次输入 0、99、0、1、-1、0、0，第四列全部输入 0，如图 9-97 所示，单击 File→Apply 保存数据，单击 File→Quit 关闭该对话框。

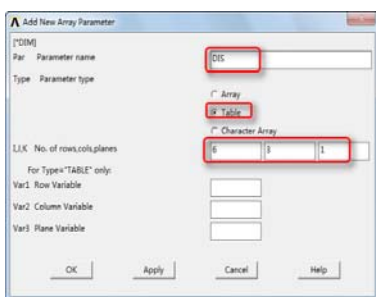


图 9-96 “Add New Array Parameter”对话框



图 9-97 “Table Array：DIS=f（Row，Column，Plane）”对话框

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 9-98 所示，在“X1，X2　X-coordinates”输入框中依次输入 0，L1，在“Y1，Y2　Y-coordinates”输入框中依次输入 0，H。

❻单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，在“X1，X2　X-coordinates”输入框中依次输入 L1，L2，在“Y1，Y2　Y-coordinates”输入框中依次输入 0，h。

❼单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，在“X1，X2　X-coordinates”输入框中依次输入 L2，L3，在“Y1，Y2　Y-coordinates”输入框中依次输入 0，h，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas，会弹出“Glue Areas”对话框，单击“Pick All”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Partial

Annulus，会弹出“Part Annular Circle”对话框，如图 9-99 所示，在“WP X”输入框输入 rx0，在“WP Y”输入框输入 ry0，在“Rad-1”输入框输入 0，在“Theta”输入框输入 45，在“Rad-2”输入框输入 r1(或 2.5)，在“Theta”输入框输入 135。

❿单击“Apply”按钮，会再弹出“Part Annular Circle”对话框，在“WP X”输入框输入 rx0，在“WP Y”输入框输入 ry0，在“Rad-1”输入框输入 0，在“Theta”输入框输入 135，在“Rad-2”输入框输入 r1(或 2.5)，在“Theta”输入框输入 225。

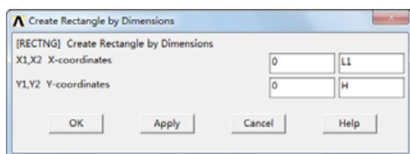



图 9-98 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

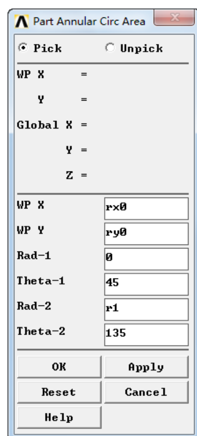



图 9-99 “Part Annular Circle”对话框

⓫单击“Apply”按钮，会再弹出“Part Annular Circle”对话框，在“WP X”输入框输入 rx0，在“WP Y”输入框输入 ry0，在“Rad-1”输入框输入 0，在“Theta”输入框输入 225，在“Rad-2”输入框输入 r1(或 2.5)，在“Theta”输入框输入 315。

⓬单击“Apply”按钮，会再弹出“Part Annular Circle”对话框，在“WP X”输入框输入 rx0，在“WP Y”输入框输入 ry0，在“Rad-1”输入框输入 0，在“Theta”输入框输入 315，在“Rad-2”输入框输入 r1(或 2.5)，在“Theta”输入框输入 405，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓭依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，选择“Area　Area numbers”，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，如图 9-100 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓮依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 9-101 所示，在第一个下拉框中选择 Areas，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”。单击“OK”按钮，会弹出“Select Areas”对话框，选择面 A2，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓯依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 9-101 所示，在第一个下拉框中选择“Areas”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“Also Select”，单击“OK”按钮，会弹出“Select Areas”对话框，选择面 A3、A6、A7，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓰依次选择 Utility Menu→Select→Everything Below→Selected Areas。

⓱依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas，会弹出“Glue Areas”对话框，单击“Pick All”按钮关闭该对话框。

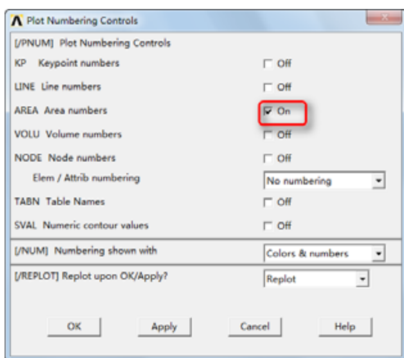



图 9-100 “Plot Numbering Controls”对话框

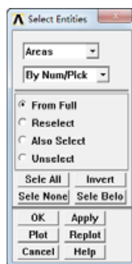



图 9-101 “Select Entities”对话框

⓲依次选择 Utility Menu→Select→Everything 命令。

⓳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Area by Line，会弹出“Divide Area by Line”对话框，如图 9-102 所示，用鼠标选择面 A4（或在“List of Items”输入框中输入 4）。

⓴单击“OK”按钮，会再次弹出“Divide Area by Line”对话框，单击“Pick All”按钮关闭该对话框。

㉑依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Area and Below，会弹出“Delete Area and Below”对话框，如图 9-103 所示，用鼠标依次选择面 A2、A8、A9、A10，单击“OK”按钮关闭该对话框。

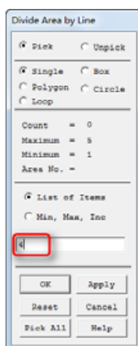



图 9-102 “Divide Area by Line”对话框

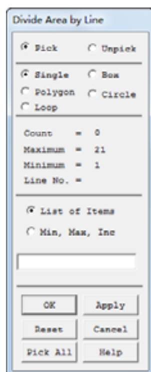



图 9-103 “Delete Area by Line”对话框

㉒依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗口将变成白色。依次选择 Utility Menu→Plot→Areas 将显示所生成的几何模型，生成的几何模型如图 9-104 所示。

㉓单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**04** 划分网格。

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Areas，重新绘制直线。

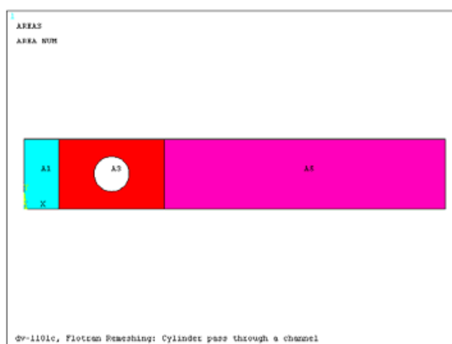



图 9-104 生成的几何模型

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshling→MeshTool，会弹出“MeshTool”对话框，如图 9-105 所示，在“Element Attributes”选择列表中选择“Areas”。

❹单击“Element Attributes”选择列表后的“Set”按钮，会弹出“Area Attributes”对话框，用鼠标选择面 A1，单击“OK”按钮会弹出“Area Attributes”对话框，如图 9-106 所示，在“TYPE　Element type number”选择列表中选择“1 FLUID141”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。



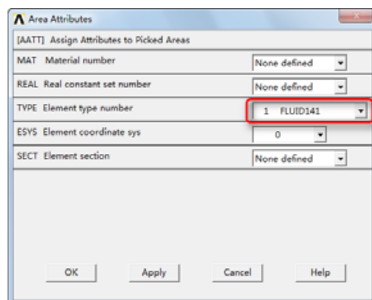




图 9-105 “MeshTool”对话框　　　图 9-106 “Area Attributes”对话框

❺单击“MeshTool”对话框中 Size Controls→Areas→Set 按钮，会弹出“Element Size on Areas”对话框，用鼠标选择面 A1。

❻单击“OK”按钮，会弹出“Element Size at Picked Areas”对话框，如图 9-107 所示，在“SIZE　Element edge length”输入框中输入 0.5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼在“MeshTool”对话框（如图 9-105 所示）的“Mesh”选择列表中选择“Areas”，在“Shape”后选择“Tri<Free”，单击“Mesh”按钮会弹出“Mesh Areas”对话框，用鼠标选择面 A1，单击“OK”按钮会生成面 A1 的网格，如图 9-108 所示。

❽单击“MeshTool”对话框中“Element Attributes”选择列表后的“Set”按钮，会

弹出“Area Attributes”对话框，用鼠标选择面 A3，单击“OK”按钮会弹出“Area Attributes”对话框，如图 9-106 所示，在“TYPE　Element type number”选择列表中选择“2 FLUID141”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

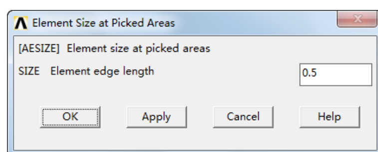



图 9-107 “Element Size at Picked Areas”对话框

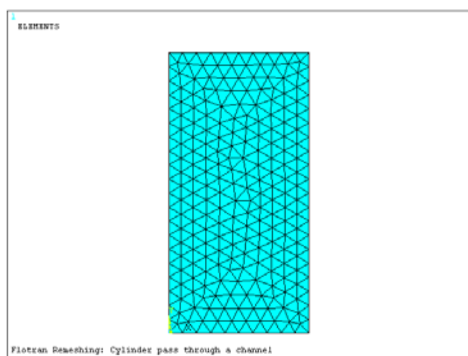



图 9-108 面 A1 的网格模型

❾单击“MeshTool”对话框中 Size Controls→Areas→Set 按钮，会弹出“Element Size on Areas”对话框，用鼠标选择面 A3。

❿单击“OK”按钮，会弹出“Element Size at Picked Areas”对话框，如图 9-107 所示，在“SIZE　Element edge length”输入框中输入 0.5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫“MeshTool”对话框中，如图 9-105 所示，在“Mesh”选择列表中选择“Areas”，在“Shape”后选择“Tri<Free”，单击 Mesh 按钮会弹出“Mesh Areas”对话框，用鼠标选择面 A3，单击“OK”按钮会生成面 A3 的网格，如图 9-109 所示。

⓬单击“MeshTool”对话框中“Element Attributes”选择列表后的 Set 按钮，会弹出“Area Attributes”对话框，用鼠标选择面 A5，单击“OK”按钮会弹出“Area Attributes”对话框，如图 9-106 所示，在“TYPE　Element type number”选择列表中选择“3 FLUID141”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓭单击“MeshTool”对话框中 Size Controls→Areas→Set 按钮，会弹出“Element Size on Areas”对话框，用鼠标选择面 A5。

⓮单击“OK”按钮，会弹出“Element Size at Picked Areas”对话框，如图 9-107 所示，在“SIZE　Element edge length”输入框中输入 2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓯在“MeshTool”对话框（如图 9-105 所示）的“Mesh”选择列表中选择“Areas”，在 Shape 后选择 Tri<Free，单击 Mesh 按钮会弹出“Mesh Areas”对话框，用鼠标选择面 A5，单击“OK”按钮会生成面 A5 的网格，如图 9-110 所示。

**05** 定义边界条件。

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

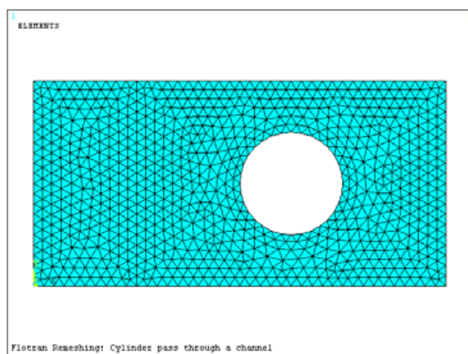



图 9-109 面 A3 的网格模型

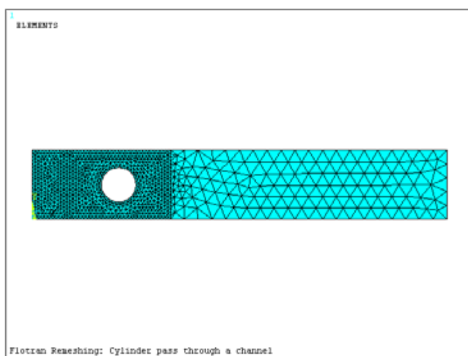



图 9-110 划分网格后的模型

❷依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，如图 9-111 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 9-112 所示。

❹“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VX a Load value”输入框输入 0，在“VY a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement→On Nodes，会弹出“Apply U on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply DISP load on nodes”对话框，如图 9-113 所示。

❻“Apply DISP load on nodes”对话框中，在“UX a Load value”输入框输入 0，在“UY a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

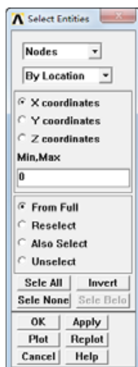



图 9-111 “Select Entities”对话框

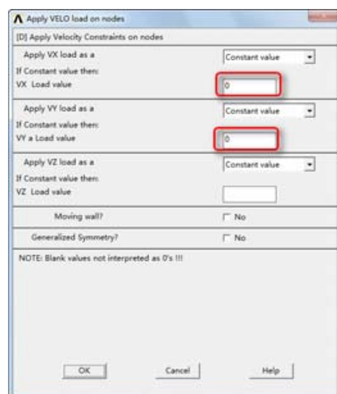



图 9-112 “Apply VELO load on Nodes”对话框

❼依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 9-111 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 L3（或 60），单击“OK”按钮关闭对话框。

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Nodes，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框，如图 9-114 所示，在“PRES Pressure value”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

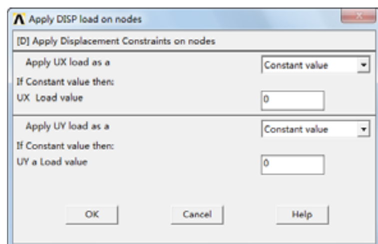



图 9-113 “Apply DISP load on nodes”对话框

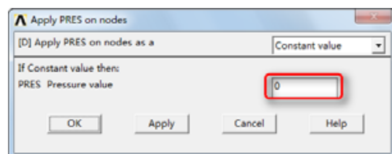



图 9-114 “Apply PRES on nodes”对话框

❾依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement→On Nodes，会弹出“Apply U on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply DISP load on nodes”对话框，如图 9-113 所示。

❿“Apply DISP load on nodes”对话框中，在“UX a Load value”输入框输入 0，在“UY a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 9-111 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓬依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹

出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 9-112 所示。

⑬“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VY　a Load value”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑭依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement→On Nodes，会弹出“Apply U on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply DISP load on nodes”对话框，如图 9-113 所示。

⑮“Apply DISP load on nodes”对话框中，在 UX　a Load value 输入框输入 0，在“UY　a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑯依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 9-111 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 h，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑰依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 9-112 所示。

⑱“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VY　a Load value”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑲依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement→On Nodes，会弹出“Apply U on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply DISP load on nodes”对话框，如图 9-113 所示。

⑳“Apply DISP load on nodes”对话框中，在“UX　a Load value”输入框输入 0，在“UY　a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉑依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 9-115 所示。单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L5、L23、L27、L25（即组成圆的四条边），单击“OK”按钮关闭对话框。

㉒依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 9-116 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉓依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement→On Nodes，会弹出“Apply U on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply DISP load on nodes”对话框，如图 9-113 所示。

㉔“Apply DISP load on nodes”对话框中，在“Apply VX load as a”的选择列表中选择“Existing table”，在 UY　a Load value 输入框输入 0，其余采用默认设置。

㉕单击“OK”按钮，会弹出“Apply DISP on nodes”对话框，如图 9-117 所示，选择列表中的“DIS”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉖依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on Nodes”对话框，如图 9-112 所示。

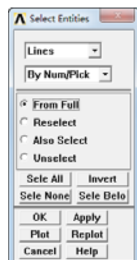



图 9-115 “Select Entities”对话框

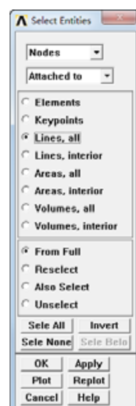



图 9-116 “Select Entities”对话框

㉗“Apply VELO load on Nodes”对话框中，在“VX　a Load value”输入框输入 1，在“VY　a Load value”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉘加载后的几何模型如图 9-118 所示。

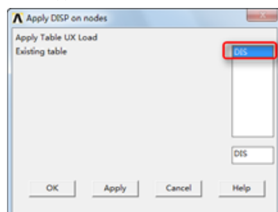



图 9-117 “Apply DISP on nodes”对话框

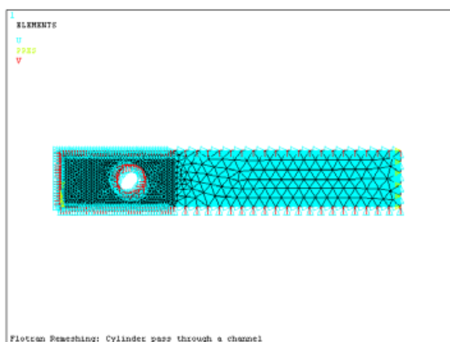



图 9-118 加载后的几何模型

## 9.4.3 求解

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Mod Res/Quad Ord→CFD Quad Orders，会弹出“Quadrature Orders”对话框，如图 9-119 所示，在“MOMD Momentum diffusion”输入框输入 2，在“MOMS Momentum source”输入框输入 2，在“PRSD Pressure diffusion”输入框输入 2，在“PRSS Pressure source”输入框输入 2，在“THRD Thermal diffusion”输入框输入 0，在“THRS Thermal source”输入框输入 0，在“TRBD Turbulent diffusion”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 9-120 所示，在“TRAN Steady state or transient？”选择列表中选择“Transient”；单击 FLOW Solve flow equations？后的方框，使“No”状态变为“Yes”；在“TURB Laminar or turbulent？”选择列表中选择“Laminar”；单击“ALE Allow mesh motion？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

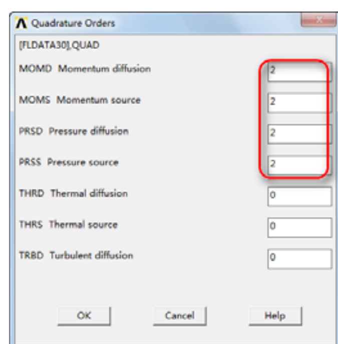



图 9-119 “Quadrature Orders”对话框

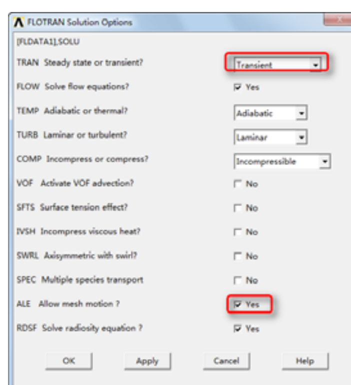



图 9-120 “FLOTRAN Solution Options”对话框

❹依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Time Step Controls”对话框，如图 9-121 所示，在“STEP Select time step control”后的选择列表选择“User defined”，在“Base output control on”后的选择列表中选择“Both”。

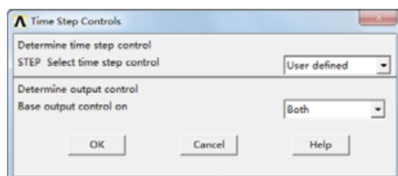



图 9-121 “Time Step Controls”对话框

❺单击“OK”按钮会弹出“Transient Controls”对话框，如图 9-122 所示，在“STEP User-defined time step”输入框输入 2，在“NUMB Number of time steps”输入框输入 100000，在“TEND Stop time”输入框输入 44，在“GLOB Global iter per time step”输入框输入 5，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 9-123 所示，采用默认设置。

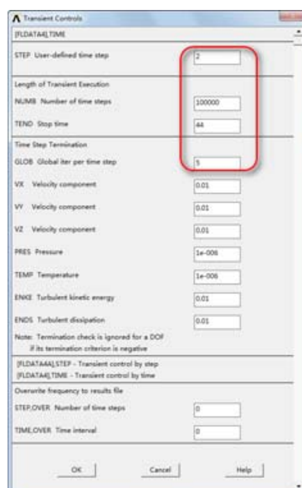


图 9-122 “Transient Controls”对话框

❼单击“OK”按钮会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 9-124 所示，在“Density property type　CONSTANT　Constant value”输入框中输入 1，在“Viscosity property type CONSTANT　Constant value”输入框中输入 1，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

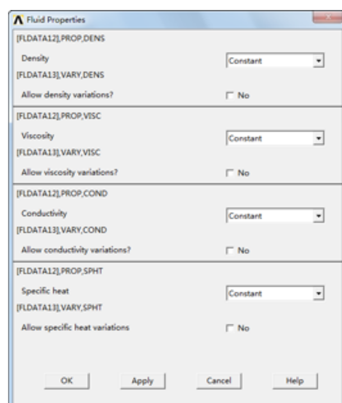


图 9-123 “Fluid Properties”对话框

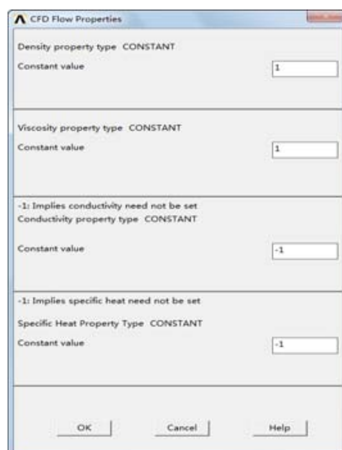


图 9-124 “CFD Flow Properties”对话框

❽依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→RefConditions，会弹出“Reference Conditions”对话框，如图 9-125 所示，在“Bulk modulus parameter”输入框中输入 1e15，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Additional Out→RFL Out Derived，会弹出“RFL Output Derived”对话框，如图 9-126 所示，单击“TAUW　Output wall shear stress？”后方框，使“No”状态变为“Yes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❿依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Transient Ctrl→Time Integration，会弹出“Time Integration Meth”对话框，如图 9-127 所示，选择“METH Select

time inte. Meth”后的“Newmark”选项。

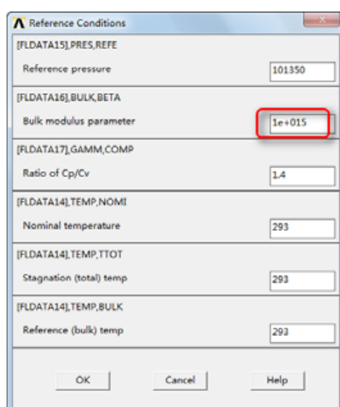



图 9-125 “Reference Conditions”对话框

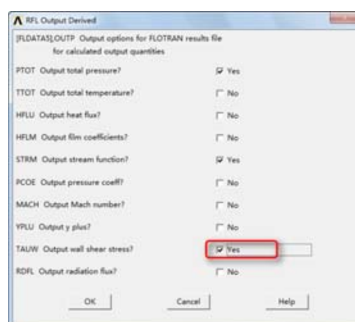



图 9-126 “RFL Output Derived”对话框

⓫单击“OK”按钮，会弹出“Newmark method”对话框，如图 9-128 所示，在“DELTA Set Delta Value”输入框输入 0.5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

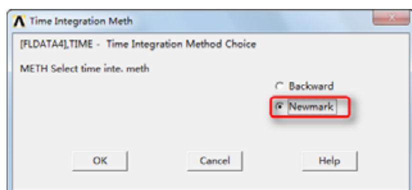



图 9-127 “Time Integration Meth”对话框

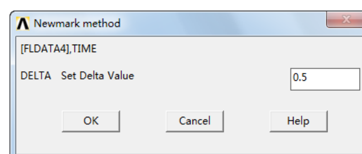



图 9-128 “Newmark method”对话框

⓬依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Remesh Ctrl→Elements for remesh，会弹出“Elements for remesh”对话框，如图 9-129 所示，在“Elements for remesh”选择列表中选择“All”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

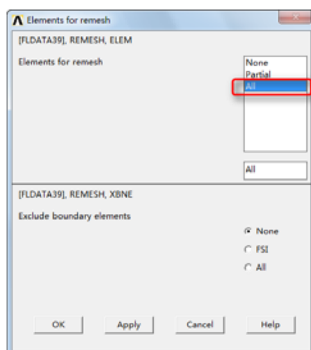



图 9-129 “Elements for remesh”对话框

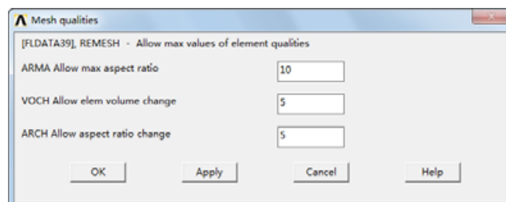



图 9-130 “Mesh qualities”对话框

⓭依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Remesh Ctrl→Mesh qualities，会弹出“Mesh qualities”对话框，如图 9-130 所示，在“ARMA　Allow max aspect ratio”输入框输入 10，在“VOCH　Allow elem volume change”输入框输入 5，在“ARCH　Allow aspect radio change”输入框输入 5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓮依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN 命令，求解一段时间后会弹出“Verify”对话框，如图 9-131 所示，单击“Yes”按钮关闭该对话框继续求解。

⓯求解完成后会弹出“Note”对话框，如图 9-132 所示，单击“Close”按钮关闭。

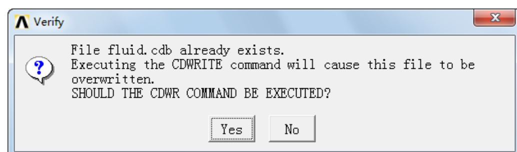



图 9-131 “Verify”对话框

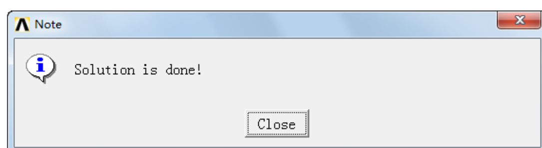



图 9-132 “Note”对话框

## 9.4.4 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

❷依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 9-133 所示。

❸在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Pressure，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 9-134 所示的压力场分布等值线图。

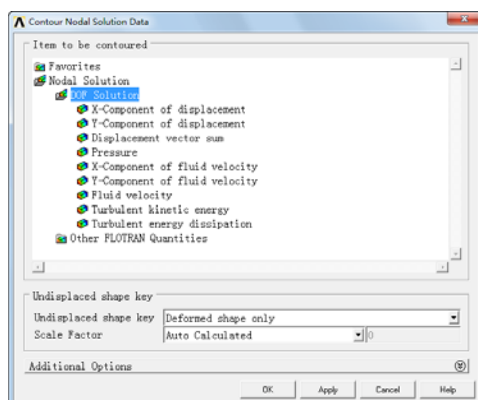



图 9-133 “Contour Nodal Solution Data”对话框

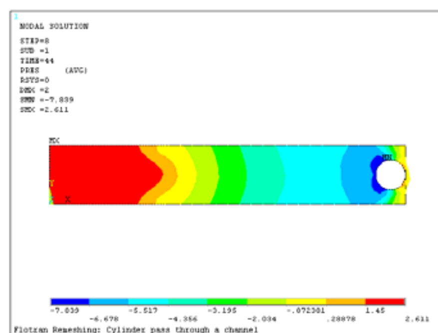



图 9-134 44s 时的压力场分布等值线图

❹在“Item to be contoured”列表框中依次选择 DOF Solution→Fluid velocity，单击

“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 9-135 所示的速度场分布等值线图。

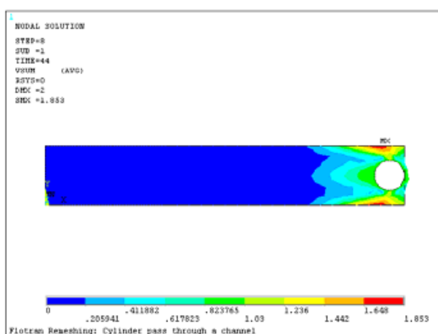



图 9-135 44s 时的速度场分布等值线

❺依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Deformed Shap，会弹出“Plot Deformed Shape”对话框，如图 9-136 所示，在“KUND Items to be plotted”选择列表中选择“Def shape only”。

❻单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 9-137 所示的 44s 时的网格模型。

❼依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operations→Define Path→By Nodes，会弹出“By Nodes”对话框，用鼠标选择模型右边边界上下两个节点，单击“OK”按钮关闭该对话框，然后定义名称为“VSUM”。

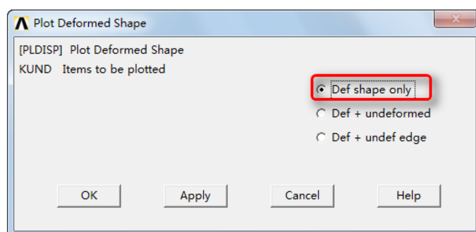



图 9-136 “Plot Deformed Shape”对话框

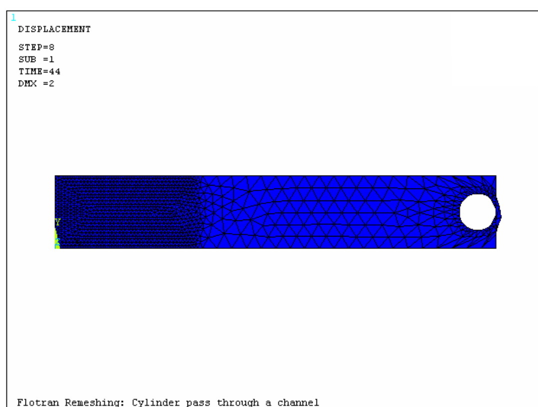



图 9-137 44s 时的网格模型

❽依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operations→Map onto Path，会弹出“Map Result Items onto Path”对话框，如图 9-138 所示，在“Lab　User label for item”输入框输入“VSUM”，在“Item，Comp　Item to be mapped”后选择 DOF solution→Velocity VSUM，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operations→Plot Path Item→On Graph，会弹出“Plot of Path Items on Graph”对话框，如图 9-139 所示，在“Lab1-6　Path items to be graphed”选择列表中选择“VSUM”。

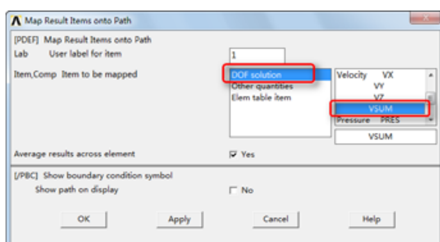


图 9-138 “Map Result Items onto Path”对话框

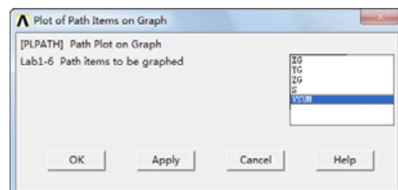


图 9-139 “Plot of Path Items on Graph”对话框

❿单击“OK”按钮， ANSYS 窗口显示如图 9-140 所示的右边边界的速度变化曲线。

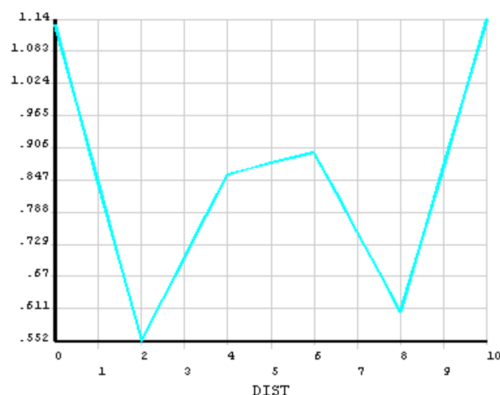



图 9-140 右边边界速度变化曲线

## 9.4.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

## 9.4.6 思考与讨论

以上的例子只给出了 44s 状态下的压力场、速度场和网格模型，若想得到任意时间（*t*<44s）的压力场、速度场和网格模型，只需在设置求解控制选项时，在图 9-122 所示的“Transient Controls”对话框的“TEND　Stop time”输入框中输入想要分析的时间，例如 10s、22s 等。

图 9-141～图 9-143 是 22s 时的压力场、速度场和网格模型。

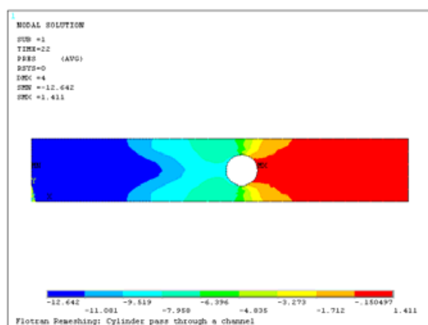



图 9-141 22s 时的压力场分布等值线图

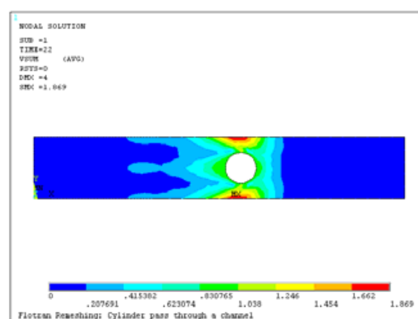



图 9-142 22s 时的速度场分布等值线

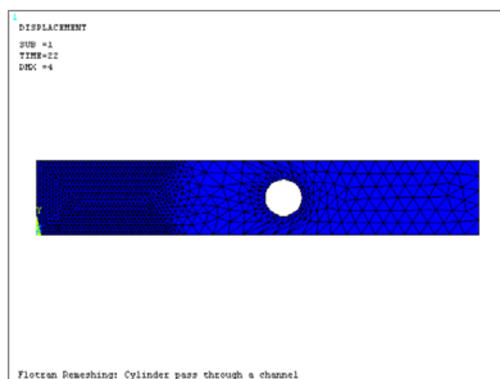



图 9-143 22s 时的网格模型

# 第10章

# 多组分传输分析及实例

多组分传输的求解方法与热分析相类似。多组分传输分析主要有以下三种类型：稀释组分、复合组分和复合气体分析。对于各个类型，温度是最主要的影响因素。

本章中给出了两个具有代表性的详细分析实例，读者可通过实例的练习加深对多组分传输分析的理解。

学 习 要 点

- 了解多组分传输的基本概念
- 通过实例加深对多组分传输分析的理解

## 10.1 混合类型

从所分析组分的性质来看，多组分传输的求解方法与热分析相类似。多组分传输分析主要有以下三种类型：稀释组分分析、复合组分分析和复合气体分析。对于各个类型，温度是最主要的影响因素。

（1）稀释组分分析　对于稀释组分分析，组分的性质对流场不会产生显著的影响。如果分析的问题是等温的或假设属性不随温度变化，可以在激活组分传输选项之前使流场趋于一致。组分的数量是单元的一个特征，可以通过单元上的一个选项来控制。KEYOPT 设置必须在前处理阶段进行。一旦确定了单元类型和组分数目，便可以在前处理或求解阶段输入多组分的命令。

可以利用以下方法激活多组分传输：

命令：FLDATAL，SOLU，SPEC，T

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Solution Options

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options

（2）复合组分分析　可以利用 MSNOMF 命令或者以下方法初始化组分的质量分数：

命令：IC，Label，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Initial Condit'n→Define

可以利用以下方法激活复合组分选项：

命令：FLDATA7，PROT，Label，CMIX

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→ Fluid Properties

（3）复合气体分析　在复合气体分析中，每个节点的流体密度可以看成是气体质量分数和相对分子质量的函数

$$\rho = \frac{P}{RT\sum_{i=1}^{N}\frac{Y_i}{M_i}}$$

式中，$R$ 是气体常数，可以利用以下方法来设置该常数：

命令：MSDATA

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species；

$M_i$ 是不同组分的相对分子质量，可以利用以下方法来设置该常数：

命令：MSDATA

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species；

$N$ 是组分总的数目；$P$ 是压力（PRES）；$T$ 是绝对温度（TEMP）。

可以利用以下方法调用复合气体选项：

命令：FLDATA7，PROT，DENS，CGAS

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties

## 10.2 多组分传输分析的基本步骤

典型的多组分传输分析主要包含以下 6 个主要步骤：

❶建模时确定组分的数目，定义组分的名称。可以利用以下方法设置组分的数目：

命令：KEYOPT，1，1，n（n 是组分的数目，$2\leq n<6$）

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

可以利用以下方法定义每个组分的名称：

命令：MSSPEC

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

组分的默认名称是 SP01、SP02 等。

❷定义组分的数学分量。传输方程可以求解出每种组分的质量分数。可以利用以下方法选择一组质量分数作为组分的数学分量：

命令：MSDATA

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species




MSDATA 命令规定了通常气体常数。

❸调整所需要的输出格式。可以利用以下方法调整输出格式：

命令：FLDATA6

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Additional Out→Print Controls

Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Additional Out→Print Controls

❹设置属性。对于稀释组分分析，可以适当地设置体积属性。如果体积属性和组分性质是线性关系，可以设置属性类型为 CMIX。可以利用以下命令来设置：

命令：FLDATA，PROT，Label，Type

上面的命令中，Label 可以是密度（DENS）、粘度（VISC）、导热系数（COND）或比热容（SPHT），Type 是 CMIX。如果 Label=DENSE，那么 Type 就是 CGAS。使用 CGAS 并利用 MSSPEC 命令或菜单路径可以设置气体的相对分子质量。

可以利用同样的方法和同样的选择来处理每组组分的属性。可以利用以下方法来设置 CONSTANT，LIQUID 和 GAS 的系数：

命令：MSPROP

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

对于所有的分析，必须要输入每种组分的质量扩散系数。对于稀释组分分析，因为流体属性决定着动量方程的求解，因此流体密度是唯一相关的属性。对于 CMIX 和 CGAS

选项，需要用 MSPROP 或相应的菜单路径设置密度和粘度。如果要求解能力方程，还要设置导热系数。

扩散项形式为

$$\nabla\cdot\left(\rho D_{mi}\nabla Y_i\right)$$

式中，$D_{mi}$ 是扩散系数；$Y_i$ 是质量分数。

有时可以把现有数据表示为施密特（Schmidt）数。下面等式表示的是层流粘度 $\mu$、密度 $\rho$ 和施密特数之间的关系

$$\rho D_{mi}\nabla Y_i=\frac{\mu}{SC_i}\nabla Y_i$$


输入数据必须与质量扩散系数有关，与施密特数无关。以上的施密特数与湍流施密特数不同。

此外，如果流场是湍流流动，式（2）可变为

$$\rho D_{mi}\nabla Y_i=\left(\frac{\mu}{SC_i}+\frac{\mu_t}{SC_{Ti}}\right)\nabla Y_i$$

式中，$SC_{Ti}$ 是湍流施密特数，可以利用以下方法设置湍流施密特数：

命令：MSSPEC

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

❺设置边界条件。在边界上，默认边界条件的质量分数是零梯度的。可以利用以下方法设置边界上的质量分数：

命令：D

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement→On Nodes

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Displacement→On Nodes

每种组分的初始化质量分数的总和必须为 1。

❻设置松弛和求解参数。可以利用以下方法改变松弛和求解参数：

命令：MSRELAX

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

推荐的惯性松弛因子为 0.1~1.0，可以利用以下方法设置修正的惯性松弛因子：

命令：MSMIR，SPNUM，Value

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

可以利用以下命令或菜单路径方法改变传输方程中数学求解器的参数和选择数学求解器：

命令：MSSOLU

MSMETH

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

激活质量分数的上限可以防止由中间计算而引起的不切实际的计算结果。可以利用以下方法激活质量分数的上限：

命令：MSCAP

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species

最后，可以利用以下方法激活多组分选项：

命令：FLDATA1，SOLU，Spec，T

菜单：Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Solution Options

## 10. 3 两相热交换分析及实例

### 10.3.1 问题描述

虽然 FLOTRAN 中流体区域与材料数是一一对应的，但也可以在允许范围之内模拟多组分流体。设置所有的流体类型为 CMIX，然后在特定的区域内设置合适的质量分数就可以模拟多组分流体。对于多组分流体模拟，在整个分析中质量分数必须为常数。

如图 10-1 所示，这是一个典型的热交换分析，中间有板相隔，板两边是两种流向相反的连续流体。

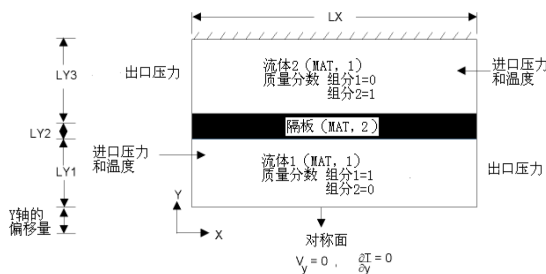



图 10-1 两相热交换模型

图中：LX=10；LY1=2，LY2=0.1，LY3=1；YOFFSET（Y 轴偏移量）=0。

### 10.3.2 前处理

**01 定义工作名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“Heat changer problem”，并将“NEW log and error files？”设置为“Yes”，如图 10-2 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“a Heat Exchanger Analysis Using Two Species”，如图 10-3 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

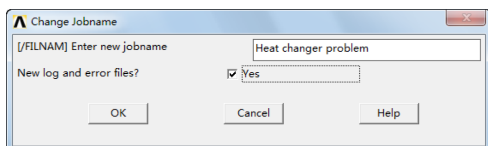



图 10-2 “Change Jobname”对话框

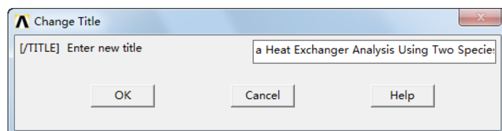



图 10-3 “Change Title”对话框

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 10-4 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

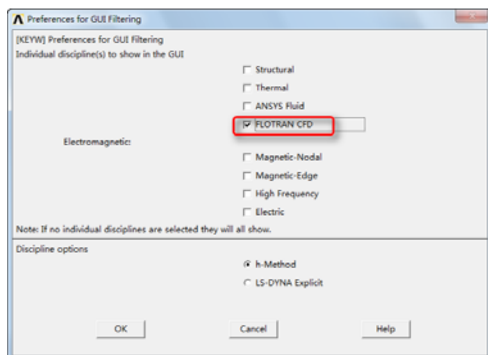



图 10-4 “Preferences for GUI Filtering”对话框

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/EditDelete，会弹出“Element Types”对话框，如图 10-5 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 10-6 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

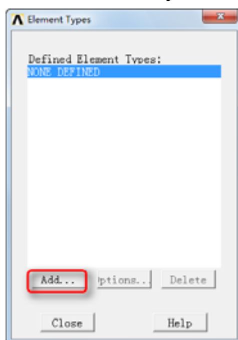



图 10-5 “Element Types”对话框

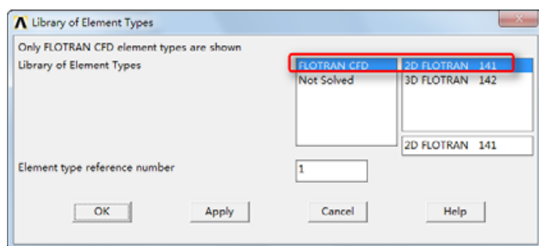



图 10-6 “Library of Element Types”对话框

❹单击“Element Types”对话框的“Options”按钮，会弹出“FLUID141 element type options”对话框，如图 10-7 所示，在“Number of species K1”选择列表中选择 2，单

击“OK”按钮关闭该对话框。

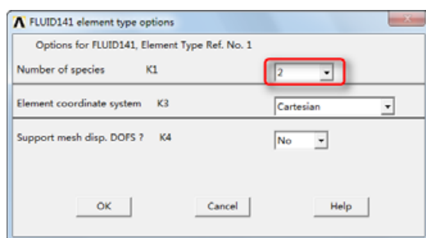



图 10-7 “FLUID141 element type options”对话框

❺单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

**03 定义模型材料。**

❶依次选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，会弹出“Define Material Model Behavior”对话框，如图 10-8 所示。

❷在“Define Material Model Behavior”对话框中的“Material Models Available”列表中，单击 CFD→Viscosity，会弹出“Viscosity for Material Number 1”对话框，在 VISC 输入框中输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Material→New Model…，会弹出“Define Material ID”对话框，如图 10-9 所示，在“Define Material ID”输入框输入 2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

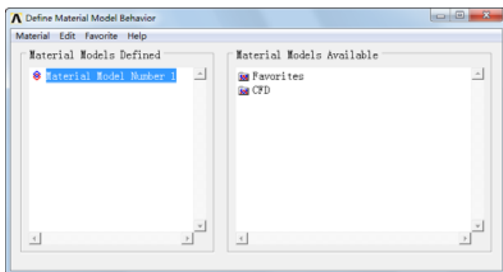



图 10-8 “Define Material Model Behavior”对话框

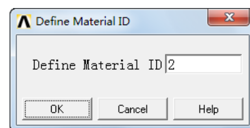



图 10-9 “Define Material ID”对话框

❹在“Define Material Model Behavior”对话框中的“Material Models Available”列表中，依次选择 CFD→Conductivity→Isotropic，会弹出“Conductivity for Material Number 2”对话框，如图 10-10 所示，在“KXX”输入框中输入 100，单击“OK”按钮关闭该对话框。

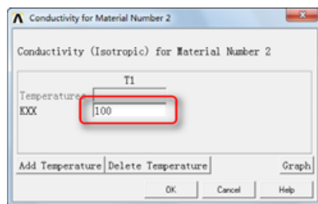



图 10-10 “Conductivity for Material Number 2”对话框

❺在“Define Material Model Behavior”对话框中的“Material Models Available”列

表中依次选择 CFD→Specific Heat，会弹出“Specific Heat for Material Number 2”对话框，如图 10-11 所示，在“C”输入框中输入 13，单击“OK”按钮关闭该对话框。

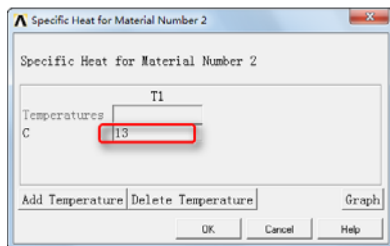



图 10-11 “Specific Heat for Material Number 2”对话框

❻在“Define Material Model Behavior”对话框中的“Material Models Available”列表中，依次选择 CFD→Density，会弹出“Density for Material Number 2”对话框，如图 10-12 所示，在“DENS”输入框中输入 5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼依次选择 Material→Exit，关闭“Define Material Model Behavior”对话框。

**04** 建立几何模型。

❶依次选择 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，会弹出“Scalar Parameters”对话框，如图 10-13 所示。在“Select”输入框中依次输入：

```
LX =10;
NDX =10;
LY1 =2;
LY2 =0.1;
LY3 =1;
NDY1 =10;
NDY2 =3;
NDY3 =10;
YOFFSET = 0。
```



每次输入完之后单击“Apply”按钮，全部输入完成之后单击“Close”按钮关闭该对话框。

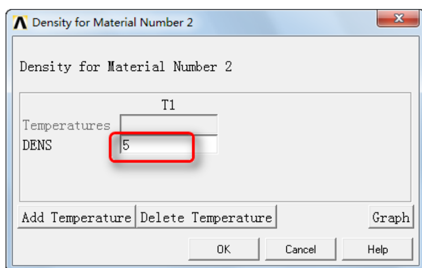



图 10-12 “Density for Material Number 2”对话框

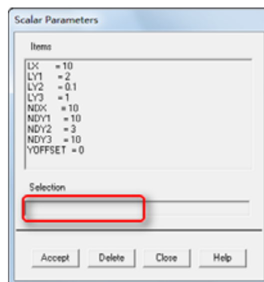



图 10-13 “Scalar Parameters”对话框

❷依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 10-14 所示，在“X1，

X2 X-coordinates”输入框中依次输入 0，LX，在“Y1，Y2 Y-coordinates“输入框中依次输入”YOFFSET，YOFFSET+LY1“。

❸单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，在“X1，X2 X-coordinates”输入框中依次输入 0，LX，在“Y1，Y2 Y-coordinates”输入框中依次输入“YOFFSET+LY1，YOFFSET+LY1+LY2”。

❹单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，在“X1，X2 X-coordinates”输入框中依次输入 0，LX，在“Y1，Y2 Y-coordinates”输入框中依次输入“YOFFSET+LY1+LY2，YOFFSET+LY1+LY2+LY3”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，选择“LINE Line numbers”，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，如图 10-15 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

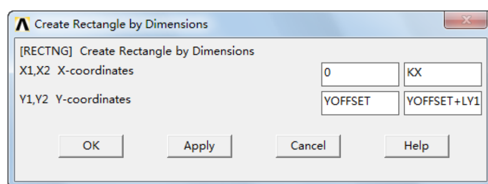



图 10-14 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

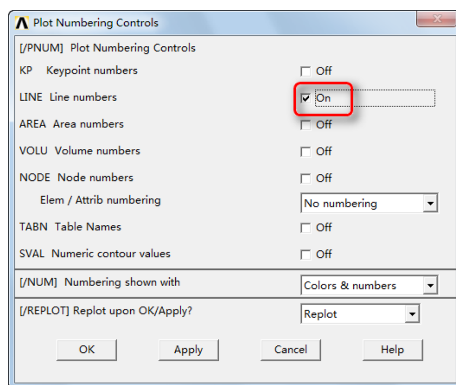



图 10-15 “Plot Numbering Controls”对话框

❻依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗口将变成白色。依次选择 Utility Menu→Plot→Areas 将显示所生成的几何模型，生成的几何模型如图 10-16 所示。

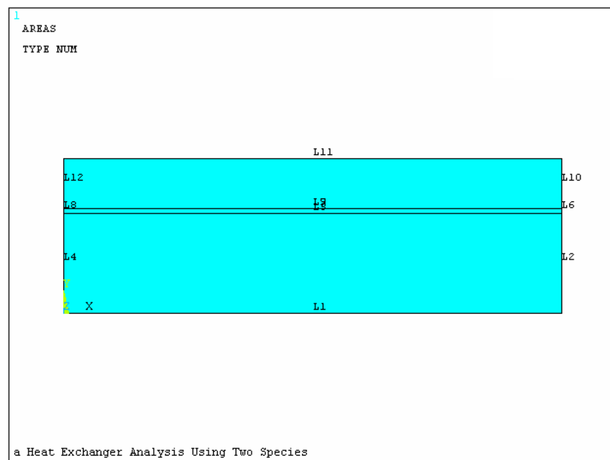



图 10-16 生成的几何模型

❼单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**05** 划分网格。

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas，会弹出“Area Attributes”对话框，用鼠标选择面 A1 和 A3（即上下面）。

❹单击“OK”按钮会弹出“Area Attributes”对话框，如图 10-17 所示，在“MAT Material number”选择列表中选择 1。

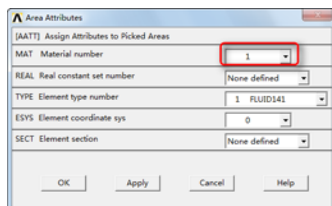



图 10-17 “Area Attributes”对话框

❺单击“Apply”按钮会弹出“Area Attributes”对话框，用鼠标选择面 A2（即中间面）。

❻单击“OK”按钮会弹出“Area Attributes”对话框，如图 10-17 所示，在“MAT Material number”选择列表中选择 2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Merge Items，会弹出“Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框，如图 10-18 所示，在“Label Type of item to be merge ”列表中选择“All”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

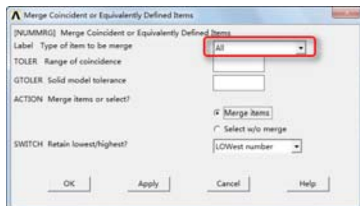



图 10-18 “Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers，会弹出“Compress Numbers”对话框，如图 10-19 所示，在“Label Item to be compressed”选择列表中选择“All”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

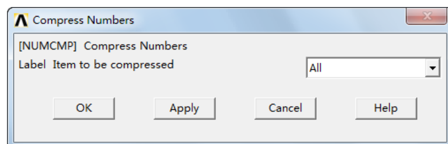



图 10-19 “Compress Numbers”对话框

❾依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第

一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-20 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L1、L3、L6 和 L9，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑩依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-21 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。




图 10-20 “Select Entities”对话框

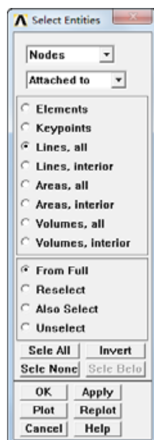



图 10-21 “Select Entities”对话框

⑪依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-22 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 NDX，单击“OK”按钮关闭该对话框。

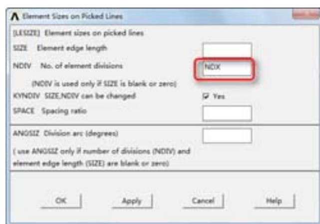



图 10-22 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

⑫依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-20 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L2 和 L4，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑬依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-21 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑭依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines

→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-22 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 NDY1，在“SPACE　Space ratio”输入框输入-5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑮依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-20 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L5 和 L7，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑯依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-21 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑰依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines →Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-22 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 NDY2，在“SPACE　Space ratio”输入框输入-5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑱依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-20 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L8 和 L10，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑲依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-21 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines →Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-22 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 NDY3，在“SPACE　Space ratio”输入框输入-5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉑依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→3 or 4 sided，会弹出“Mesh Areas”对话框，单击“Pick All”按钮，划分的网格模型如图 10-23 所示。

㉒单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**06 定义边界条件。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything，再依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❷依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-20 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L4，单击“OK”按钮关闭对话框。

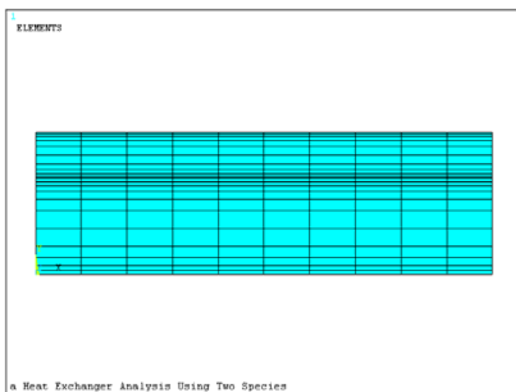



图 10-23 划分网格后的模型

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-21 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❹依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Nodes，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框，如图 10-24 所示，在“PRES Pressure value”输入框输入 10，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框，如图 10-25 所示，在“Lab2 DOFs to be constrained”选择列表中选择“TEMP”，在“VALUE Load TEMP value”输入框输入 100，单击“OK”按钮关闭该对话框。

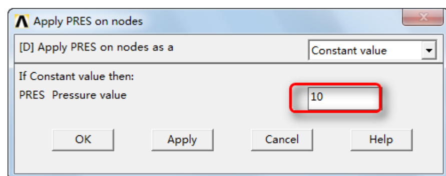



图 10-24 “Apply PRES on nodes”对话框

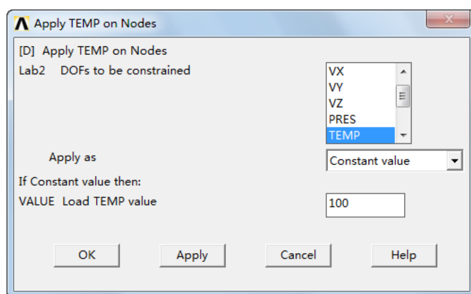



图 10-25 “Apply TEMP on Nodes”对话框

❻依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-20 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L2，单击“OK”按钮关闭对话框。

❼依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-21 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Nodes，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框，如图 10-24 所示，在“PRES　Pressure value”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-20 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L1，单击“OK”按钮关闭对话框。

❿依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-21 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on nodes”对话框，如图 10-26 所示。

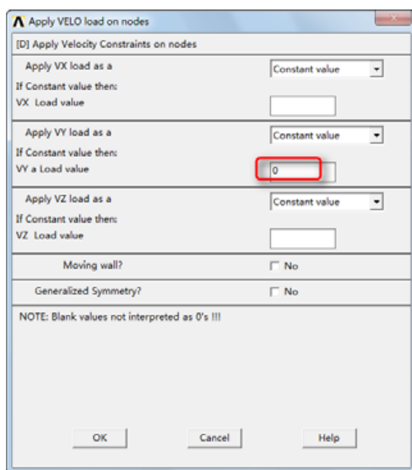



图 10-26 “Apply VELO load on nodes”对话框

⓬“Apply VELO load on nodes”对话框中，在“VY　a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓭依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-20 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L8，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓮依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-21 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓯依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Nodes，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框，如图 10-24 所示，在“PRES　Pressure value”输入框输入 10，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑯依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes，会弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框，如图 10-25 所示，在“Lab2　DOFS to be constrained”选择列表中选择“TEMP”，在“VALUE　Load　TEMP value”输入框输入 400，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑰依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-20 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L10，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑱依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-21 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑲依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Nodes，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框，如图 10-24 所示，在“PRES　Pressure value”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑳依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-20 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L9，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉑依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-21 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉒依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on nodes”对话框，如图 10-26 所示。

㉓“Apply VELO load on nodes”对话框中，在“VX　a Load value”输入框输入 0，在“VY　a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

### 10.3.3 求解

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything，再依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 10-27 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入“，lx”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❷依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 10-27 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入“0，ly1”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸依次选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Initial Condit'n→Define，会弹出“Define Initial Conditions”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Define Intial

Conditions”对话框，如图 10-28 所示，在“Lab　DOF to be specified”选择列表中选择 SP01，在“VALUE　Initial value of DOF”输入框输入 1。

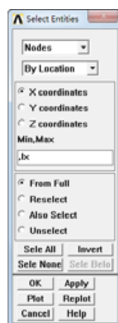



图 10-27 “Select Entities”对话框

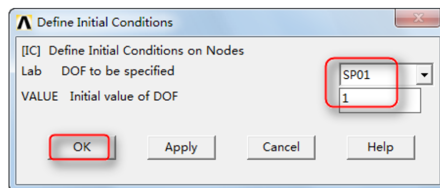



图 10-28 “Define Initial Conditions”对话框

❹单击“Apply”按钮，会再次弹出“Define Initial Conditions”对话框，单击“Pick All”按钮，会再次弹出“Define Initial Conditions”对话框，如图 10-28 所示，在“Lab　DOF to be specified”选择列表中选择 SP02，在“VALUE　Initial value of DOF”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 10-27 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入“，lx”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❻依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 10-27 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入“ly1+ly2，ly1+ly2+ly3”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❼依次选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Initial Condit'n→Define，会弹出“Define Initial Conditions”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Define Intial Conditions”对话框，如图 10-28 所示，在“Lab　DOF to be specified”选择列表中选择 SP01，在“VALUE　Initial value of DOF”输入框输入 0。

❽单击“Apply”按钮，会再次弹出“Define Initial Conditions”对话框，单击“Pick All”按钮，会再次弹出 Define Intial Conditions 对话框，如图 10-28 所示，在“Lab　DOF to be specified”选择列表中选择“SP02”，在“VALUE　Initial value of DOF”输入框输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 10-29 所示，在“EXEC　Global iterations”输入框中输入 200，在“PRES Pressure”输入框中输入 1e-9，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❿依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 10-30 所示，在“Density”选择列表中选择“CMIX”，

单击“Allow density variations？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”；在“Viscosity”选择列表中选择“CMIX”，单击“Allow viscosity variations？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”；在“Conductivity”选择列表中选择“CMIX”，单击“Allow conductivity variations？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”；在“Specific heat”选择列表中选择“CMIX”，单击“Allow specific heat variations？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

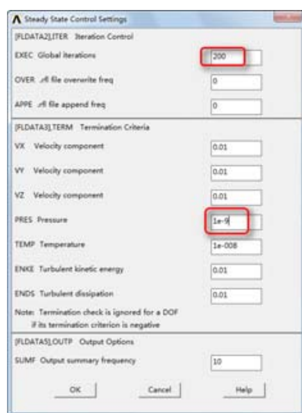


图 10-29 “Steady State Control Settings”对话框



图 10-30 “Fluid Properties”对话框

⓫单击“OK”按钮，会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 10-31 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓬依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 10-30 所示，在“Density”选择列表中选择“Constant”；在“Viscosity”选择列表中选择“Constant”；在“Conductivity”选择列表中选择“Constant”；在“Specific heat”选择列表中选择“Constant”，其余采用默认设置。

⓭单击“OK”按钮，会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 10-32 所示，在 4 个输入框中依次输入 1、2、3、4，单击“OK”按钮关闭该对话框。



图 10-31 “CFD Flow Properties”对话框



图 10-32 “CFD Flow Properties”对话框

⓮依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species，会弹出“Multiple Specifies”对话框，如图 10-33 所示，采用默认设置。

⓯单击“OK”按钮会弹出“Multiple Specifies”子对话框，如图 10-34 所示，在“Select

a species number”选择列表中选择“Species #1”，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Properties”。

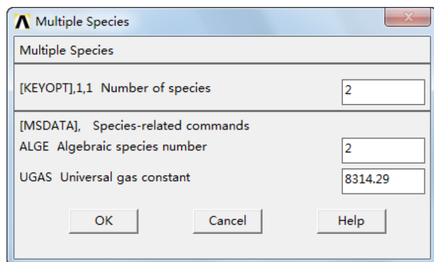



图 10-33 “Multiple Species”对话框

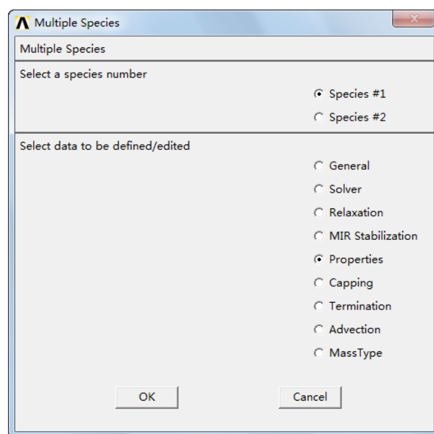



图 10-34 “Multiple Species”子对话框

⑯单击“OK”按钮会弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-35 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Density”。

⑰单击“OK”按钮会弹出“Species Density”对话框，如图 10-36 所示，在“NOMI Nominal value”输入框中输入 1，其余采用默认设置。

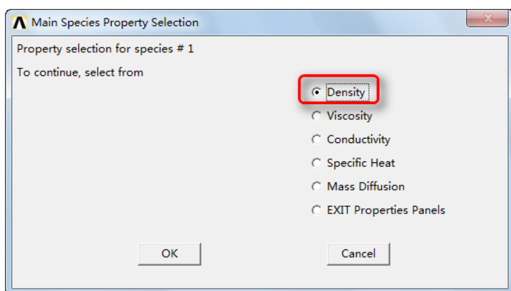



图 10-35 “Main Species Property Selection”对话框

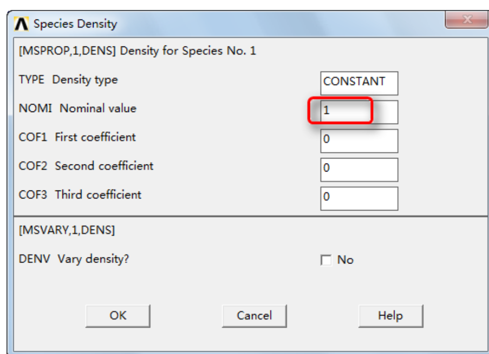



图 10-36 “Species Density”对话框

⑱单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-35 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Viscosity”。

⑲单击“OK”按钮会弹出“Species Viscosity”对话框，如图 10-37 所示，在“NOMI Nominal value”输入框中输入 1，其余采用默认设置。

⑳单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-35 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Conductivity”。

㉑单击“OK”按钮会弹出“Species Conductivity”对话框，如图 10-38 所示，在“NOMI Nominal value”输入框中输入 0.1，其余采用默认设置。

㉒单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-35

所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Specific Heat”。

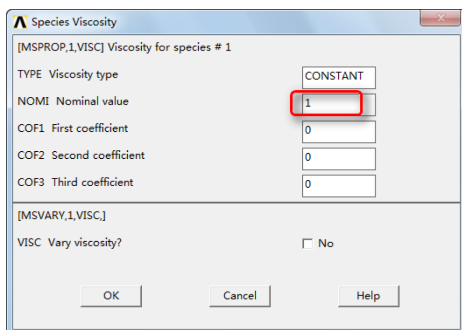



图 10-37 “Species Viscosity”对话框

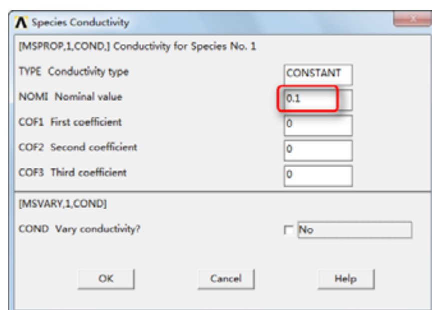



图 10-38 “Species Conductivity”对话框

㉓单击“OK”按钮会弹出“Species Specific Heat”对话框，如图 10-39 所示，在“NOMI Nominal value”输入框中输入 1，其余采用默认设置。

㉔单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-35 所示，单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

㉕依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species，会弹出“Multiple Specifies”对话框，如图 10-33 所示，采用默认设置。

㉖单击“OK”按钮会弹出“Multiple Specifies”子对话框，如图 10-34 所示，在“Select a species number”选择列表中选择 Species #2，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Properties”。

㉗单击“OK”按钮会弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-35 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Density”。

㉘单击“OK”按钮会弹出“Species Density”对话框，如图 10-36 所示，在“NOMI Nominal value”输入框中输入 2，其余采用默认设置。

㉙单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-35 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Viscosity”。

㉚单击“OK”按钮会弹出“Species Viscosity”对话框，如图 10-37 所示，在“NOMI Nominal value”输入框中输入 2，其余采用默认设置。

㉛单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-35 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Conductivity”。

㉜单击“OK”按钮会弹出“Species Conductivity”对话框，如图 10-37 所示，在“NOMI Nominal value”输入框中输入 0.2，其余采用默认设置。

㉝单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-35 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Specific Heat”。

㉞单击“OK”按钮会弹出“Species Specific Heat”对话框，如图 10-38 所示，在“NOMI Nominal value”输入框中输入 2，其余采用默认设置。

㉟单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-35 所示，单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

㊱依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→PRES Solver CFD，会弹出“PRES Solver CFD”对话框，如图 10-40 所示，采用默认设置。

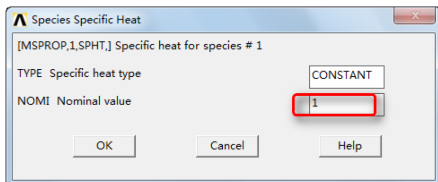



图 10-39 “Species Specific Heat”对话框

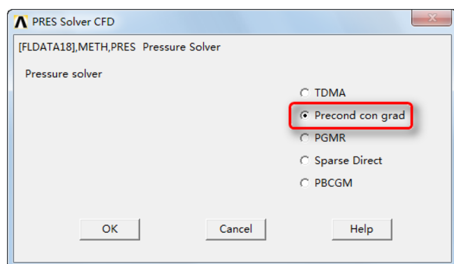



图 10-40 “PRES Solver CFD”对话框

㊲单击“OK”按钮会弹出“Semi Direct Solver Options for Pressure”对话框，如图 10-41 所示，在“Convergence criterion”输入框中输入 1e-10，单击“OK”按钮关闭该对话框。

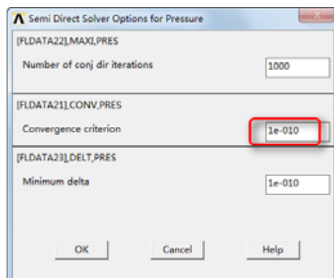



图 10-41 “Semi Direct Solver Options for Pressure”对话框

㊳依次选择 Utility Menu→Select→Everything，再依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 10-42 所示。

㊴依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 10-43 所示，单击“FLOW Solve flow equations？”后的方框，使“Yes”状态变为“No”；在“TEMP Adiabatic or thermal？”选择列表中选择“Thermal”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㊵依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 10-29 所示，在“EXEC Global iterations”输入框中输入 50，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㊶依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF Relaxation，会弹出 DOF Relaxation 对话框，如图 10-44 所示，在 TEMP Temperature relaxation 输入框输入 1，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㊷依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 10-45 所示。

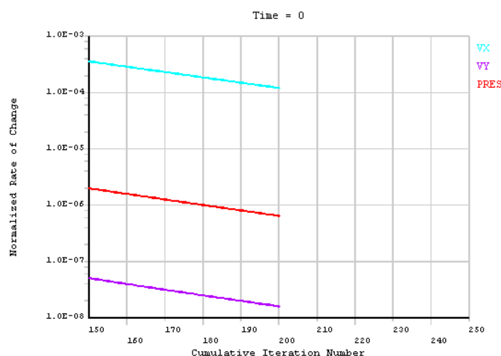



图 10-42 迭代曲线




图 10-43 “FLOTRAN Solution Options”对话框

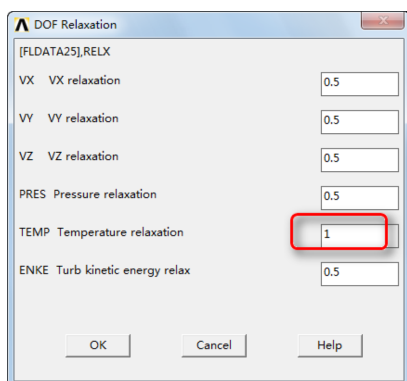



图 10-44 DOF Relaxation 对话框

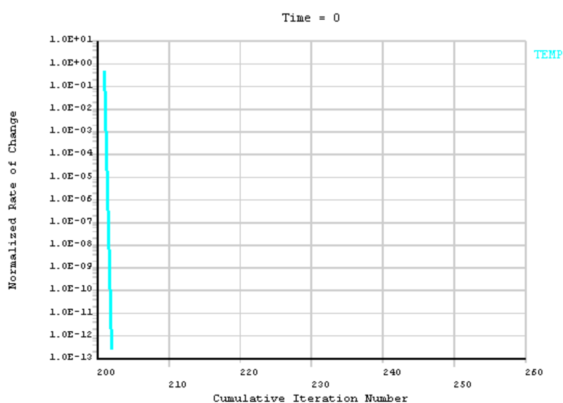



图 10-45 迭代曲线

## 10.3.4 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

❷依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 10-46 所示。

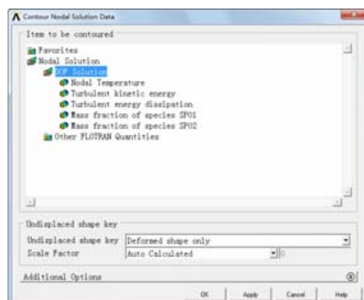


图 10-46 “Contour Nodal Solution Data”对话框

❸在“Item to be contoured”列表中，依次选择 Nodal Solution→DOF Solution→Nodal Temperature，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 10-47 所示的温度场分布等值线图。

❹在“Item to be contoured”列表中，依次选择 Nodal Solution→DOF Solution→Pressure，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 10-48 所示的压力场分布等值线图。

❺依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operations→Define Path→By Nodes，会弹出“By Nodes”对话框，用鼠标选择模型右边边界上下两个节点（即 K2 和 K7）。

❻单击“OK”按钮会弹出“By Nodes”对话框，如图 10-49 所示，“Name Define Path Name”输入框输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

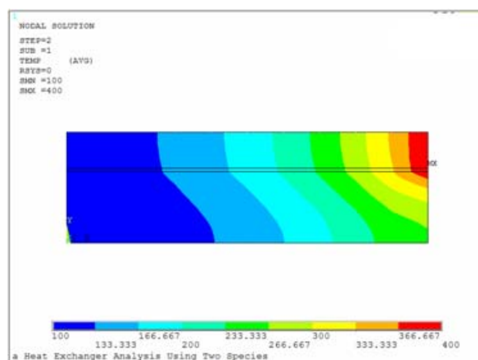



图 10-47 温度场分布等值线图

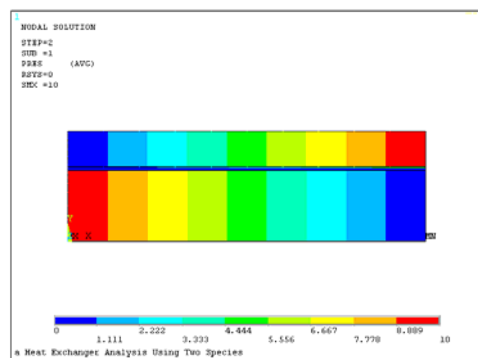



图 10-48 压力场分布等值线图

❼依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operations→Map onto Path，会弹出“Map Result Items onto Path”对话框，如图 10-50 所示，在“Item，Comp Item to be mapped”后选择 DOF solution→TEMP，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operations→Plot Path Item→On Graph，会弹出“Plot of Path Items on Graph”对话框，如图 10-51 所示，在“Lab1-6 Path items to be graphed”选择列表中选择“TEMP”。

❾单击“OK”按钮，“ANSYS”窗口将显示如图 10-52 所示的右边边界的温度变化

曲线。

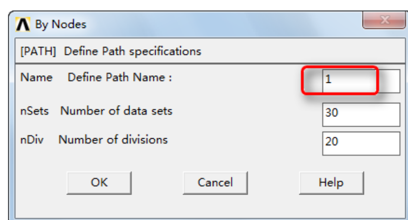



图 10-49 By Nodes 对话框

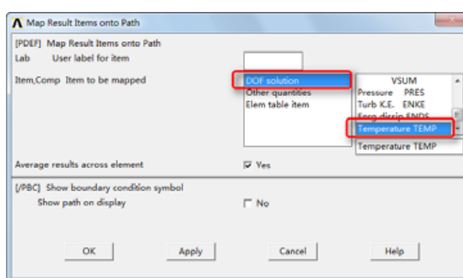



图 10-50 “Map Result Items onto Path”对话框

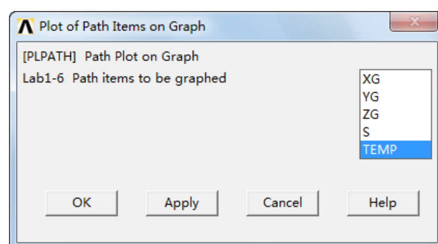



图 10-51 “Plot of Path Items on Graph”对话框

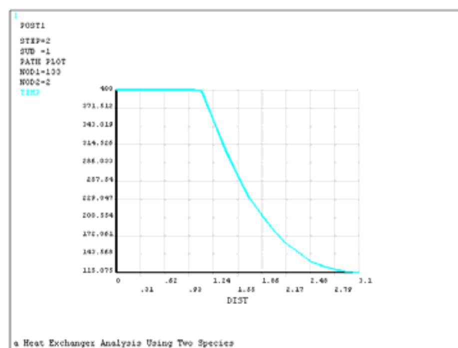



图 10-52 右边边界温度变化曲线

### 10.3.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

## 10.4 三种气体混合分析及实例

### 10.4.1 问题描述

下面例子的是三种气体组分的分析，三种气体分别是：氧气（$O_2$）、氮气（$N_2$）和氢气（$H_2$）。表 10-1 给出了三个入口处的气体参数，图 10-53 是分析的几何模型示意图。

表 10-1 气体参数

| | 上入口 | 左入口 | 下入口 |
|---|---|---|---|
| 速度（VX） | 0 | 0.1 | 0 |
| 速度（VY） | -0.1 | 0 | 0.1 |
| 温度（TEMP） | 300 | 400 | 300 |
| 组分 | 氧气 | 氮气 | 氢气 |

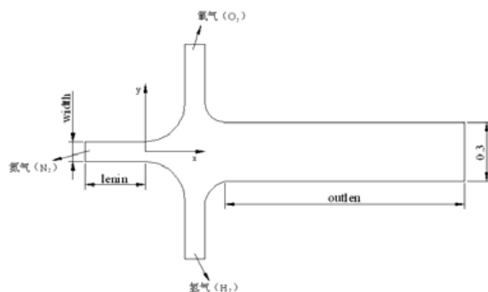



图 10-53 几何模型示意图

图中：lenin=0.3；width=0.15；outlen=1.2.

## 10.4.2 前处理

**01 定义工作名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“Three Gases”，并将“NEW log and error files？”设置为“Yes”，如图 10-54 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Analysis Mixing Three Gases”，如图 10-55 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

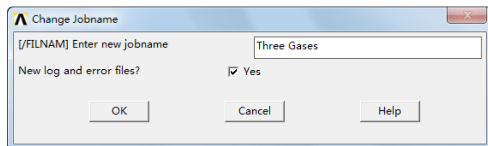



图 10-54 “Change Jobname”对话框

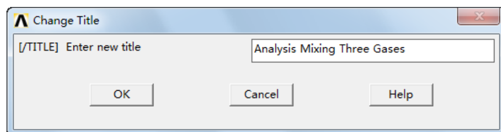



图 10-55 “Change Title”对话框

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“FLOTRAN CFD”，如图 10-56 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/EditDelete，会弹出“Element Types”对话框，如图 10-57 所示。

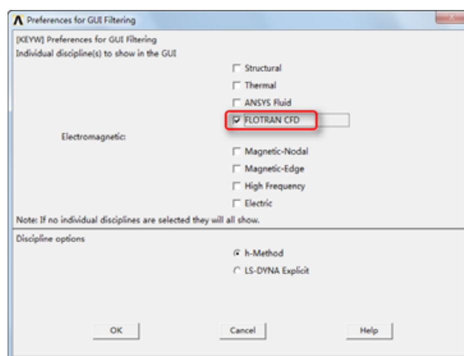



图 10-56 “Preferences for GUI Filtering”对话框

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择“FLOTRAN CFD”和“2D FLOTRAN 141”，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 10-58 所示。单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。

❹单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

**03** 建立几何模型。

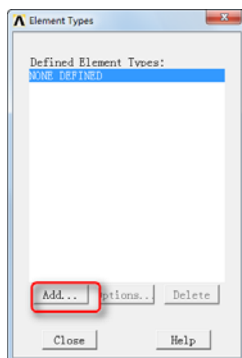



图 10-57 “Element Types”对话框

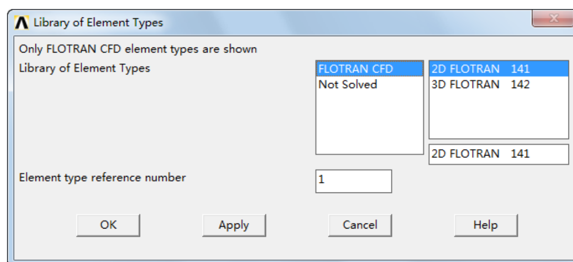



图 10-58 “Library of Element Types”对话框

❶依次选择 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，会弹出“Scalar Parameters”对话框，如图 10-59 所示。在“Select”输入框中依次输入：

```
lenin=0.3;
half=lenin/2;
width=0.1;
hfwid=width/2;
outlen=1.2;
nlcurv=16;
rlcurv=1;
nscurv=9;
```

```
rscurv=1;
nispan=8;
rispan=-1.5;
nospan=13;
rospan=-2;
nilen=10;
rilen=-2;
nolen=24;
rolen=4;
vbot=0.1;
vlef=0.1;
vtop=0.1。
```



每次输入完之后单击“Apply”按钮，全部输入完成之后单击“Close”按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，会弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，如图 10-60 所示，在“X1，X2 X-coordinates”输入框中依次输入-lenin，0，在“Y1，Y2 Y-coordinates”输入框中依次输入-hfwid，hfwid。

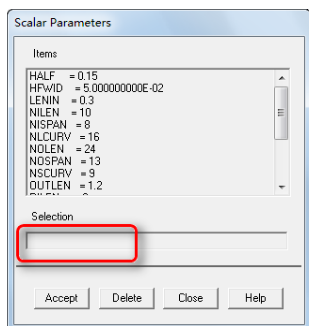



图 10-59 “Scalar Parameters”对话框

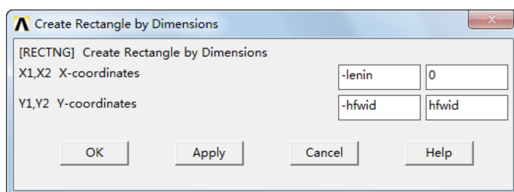



图 10-60 “Create Rectangle by Dimensions”对话框

❸单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，在“X1，X2 X-coordinates”输入框中依次输入 0.2，0.3，在“Y1，Y2 Y-coordinates”输入框中依次输入 0.25，0.25+lenin。

❹单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，在“X1，X2 X-coordinates”输入框中依次输入 0.2，0.3，在“Y1，Y2 Y-coordinates”输入框中依次输入-0.25，-0.25-lenin。

❺单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Rectangle by Dimensions”对话框，在“X1，X2 X-coordinates”输入框中依次输入 0.4，0.4+outlen，在 Y1，Y2 Y-coordinates 输入框中依次输入-0.15，0.15，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，单击“KP Keypoint numbers”后的方框，使其状态从“Off”变为“On”；单

击“Line　Line numbers”后的方框，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，如图 10-61 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

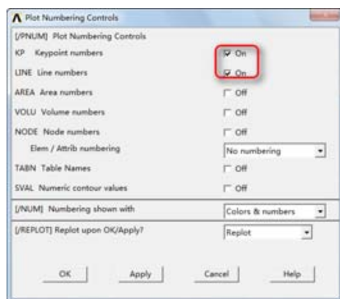


图 10-61 “Plot Numbering Controls”对话框

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines，会弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取线段 L3，单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取点 K3；单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取线段 L8，单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取点 K8，单击“OK”按钮会自动生成圆弧，单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines，会弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取线段 L6，单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取点 K6；单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取线段 L15，单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取点 K16，单击“OK”按钮会自动生成圆弧，单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines，会弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取线段 L10，单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取点 K11；单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取线段 L13，单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取点 K13，单击“OK”按钮会自动生成圆弧，单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

❿依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Tan to 2 Lines，会弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取线段 L1，单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取点 K2；单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取线段 L12，单击“OK”按钮会再次弹出“Line Tangent to…”选取对话框，用鼠标选取点 K12，单击“OK”按钮会自动生成圆弧，单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

⓫依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→By Lines，会弹出“Create Area by Lines”选取对话框，用鼠标依次选取线段 L2、L17、L5、L18、L16、L19、L11、L20，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑫依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗口将变成白色。依次选择 Utility Menu→Plot→Areas 将显示所生成的几何模型，生成的几何模型如图 10-62 所示。

⑬单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

**04 划分网格。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L17 和 L20，单击“OK”按钮关闭对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

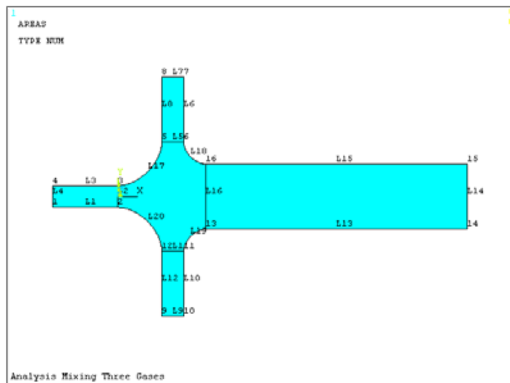



图 10-62 生成的几何模型

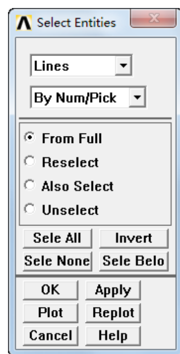



图 10-63 “Select Entities”对话框

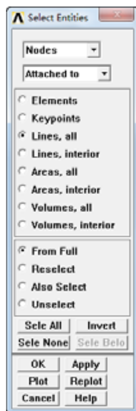



图 10-64 “Select Entities”对话框

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines

→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-65 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 nlcurv，在“SPACE　Spacing ratio”输入框输入 rlcurv，单击“OK”按钮关闭该对话框。

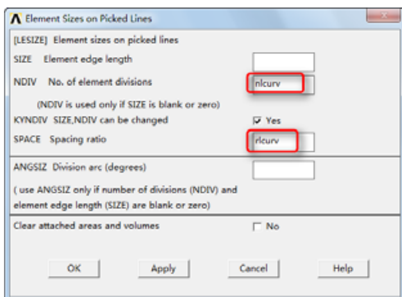



图 10-65 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

❻依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L18 和 L19，单击“OK”按钮关闭对话框。

❼依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-65 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 nscurv，在“SPACE　Spacing ratio”输入框输入 rscurv，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L2、L5 和 L11，单击“OK”按钮关闭对话框。

❿依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-65 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 nisapan，在“SPACE　Spacing ratio”输入框输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓬依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第

一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L4、L7 和 L9，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑬依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑭依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出 “Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-65 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 nispan，在“SPACE Spacing ratio”输入框输入 rispan，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑮依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L1、L3、L6、L8、L10 和 L12，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑯依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑰依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-65 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 nilen，在“SPACE Spacing ratio”输入框输入 rilen，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑱依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L13，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑲依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-65 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 nolen，在“SPACE Spacing ratio”输入框输入 rolen，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉑依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话

框，选择线段 L15，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉒依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉓依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-65 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 nolen，在“SPACE　Spacing ratio”输入框输入 1/rolen，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉔依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L14 和 L16，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉕依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉖依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on …”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 10-65 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入“nospan”，在“SPACE　Spacing ratio”输入框输入“rospan”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉗依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，如图 10-61 所示，单击“Area　Area numbers”后的方框，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉘依次选择 Utility Menu→Select→Everything 命令，依次选择 Utility Menu→Plot→Areas。

㉙依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→3 or 4 sided，会弹出 Mesh Areas 对话框，用鼠标选取面 A1、A2、A3 和 A4，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉚依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshling→MeshTool，会弹出 MeshTool 对话框，如图 10-66 所示，在“Shape”选框中选择“Tri”和“Free”，单击 Mesh 按钮会弹出“Mesh Areas”对话框，用鼠标选择面“A5”，单击“OK”按钮关闭“Mesh Areas”对话框，单击“Close”按钮关闭“MeshTool”对话框。生成网格后的模型如图 10-67 所示。

**05** 定义边界条件。

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything，依次选择 Utility Menu→Plot→Lines，重新绘制直线。

❷依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第

一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L1、L3、L6、L8、L10、L12、L13、L15、L17、L18、L19 和 L20，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❹依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on nodes”对话框，如图 10-68 所示。




图 10-66 “MeshTool”对话框

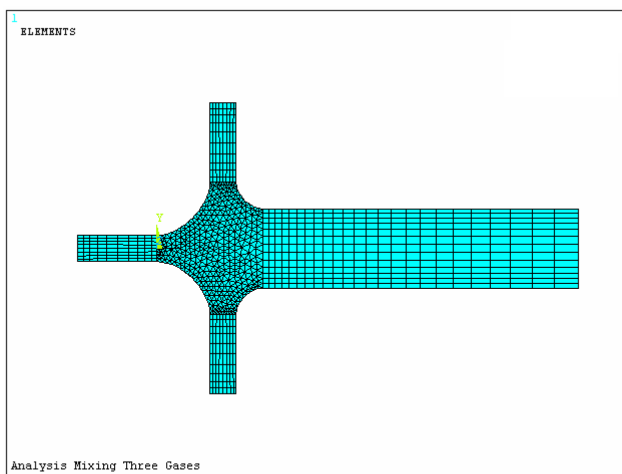



图 10-67 划分网格后的模型

❺“Apply VELO load on nodes”对话框中，在“VX a Load value”输入框输入 0，在“VY a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L7，单击“OK”按钮关闭对话框。

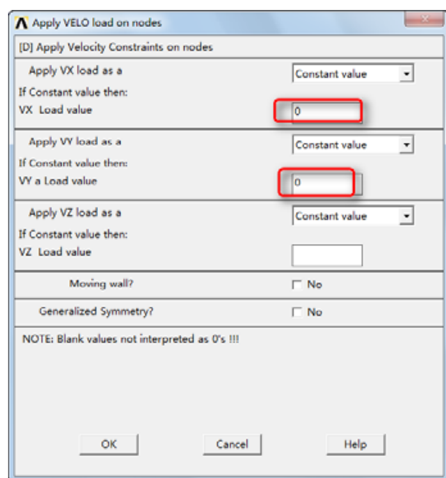
❼依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes 命令，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on nodes”对话框，如图 10-68 所示。

❾“Apply VELO load on nodes”对话框中，在“VX a Load value”输入框输入 0，在“VY a Load value”输入框输入“-vtop”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❿依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature →On Nodes，会弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框，如图 10-69 所示，在“Lab2 DOFS to be constrained”选择列表中选择“TEMP”，在“VALUE Load TEMP value”输入框输入 300，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L4，单击“OK”按钮关闭对话框。



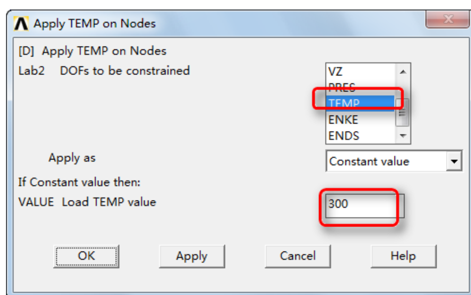




图 10-68 “Apply VELO load on nodes”对话框　　图 10-69 “Apply TEMP on Nodes”对话框

⓬依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓭依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on nodes”对话框，如图 10-68 所示。

⓮“Apply VELO load on nodes”对话框中，在“VX a Load value”输入框输入“vlef”，在“VY a Load value”输入框输入 0，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓯依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature →On Nodes，会弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框，如图 10-69 所示，在“Lab2 DOFS to be constrained”选择列表中选择“TEMP”，在“VALUE Load TEMP value”输入框输入 400，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑯依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L9，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑰依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑱依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Velocity→On Nodes，会弹出“Apply V on Nodes”对话框。单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply VELO load on nodes”对话框，如图 10-68 所示。

⑲“Apply VELO load on nodes”对话框中，在 VX a Load value 输入框输入 0，在“VY a Load value”输入框输入“vbot”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature →On Nodes，会弹出“Apply TEMP on Nodes”对话框，如图 10-69 所示，在“Lab2 DOFS to be constrained”选择列表中选择“TEMP”，在“VALUE Load TEMP value”输入框输入 300，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉑依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L14，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉒依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉓依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Nodes，会弹出“Apply PRES on nodes”对话框，如图 10-70 所示，在“PRES Pressure value”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉔依次选择 Main Menu→ Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Additional Out→Print Controls，会弹出“FLOTRAN Print Controls”对话框，如图 10-71 所示，在“ITER Conv monitor print iter”输入框输入 5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

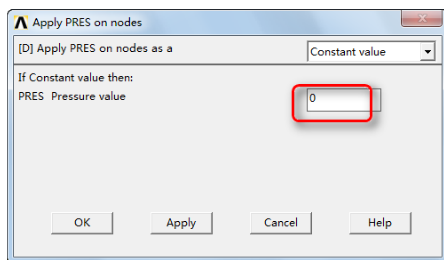



图 10-70 “Apply PRES on nodes”对话框

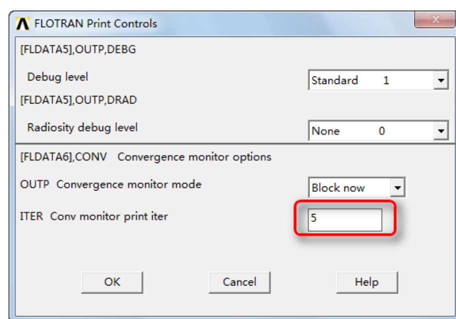


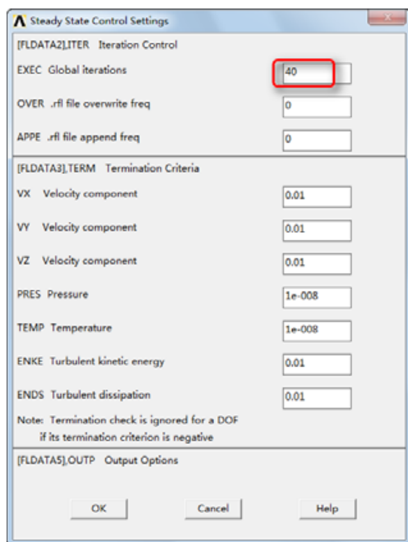

图 10-71 “FLOTRAN Print Controls”对话框

## 10.4.3 求解

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything，再依次选择 Utility Menu→Plot→Elements。

❷依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 10-72 所示，在“EXEC　Global iterations”输入框中输入 40，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Flow Environment→Ref Conditions，会弹出“Reference Conditions”对话框，如图 10-73 所示，在“Nomi temperature”输入框输入 300，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。



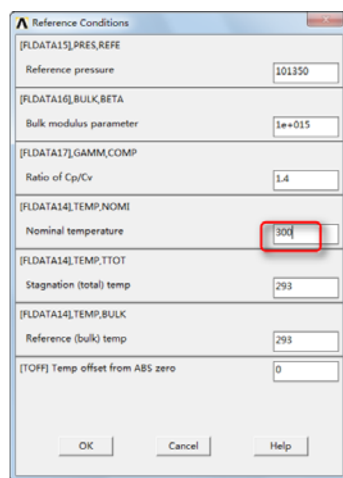




图 10-72 “Steady State Control Settings”对话框　图 10-73 “Reference Conditions”对话框

❹依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 10-74 所示，在“Density”选择列表中选择“AIS-SI”，单击“Allow density variations？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”；在“Viscosity”选择列表中选择“AIS-SI”，单击“Allow viscosity variations？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”；在“Conductivity”选择列表中选择 AIS-SI，单击“Allow conductivity variations？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”；在“Specific heat”选择列表中选择 AIS-SI。

❺单击“OK”按钮，会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 10-75 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，点击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 10-76 所示。




前面的 40 步迭代过程是为了将管中的空气加热至 300℃，之后的二次前处理和二次求解是三种组分的传输分析。

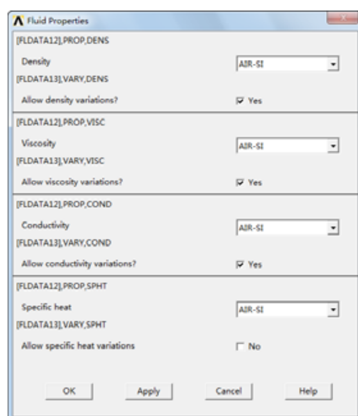



图 10-74 “Fluid Properties”对话框

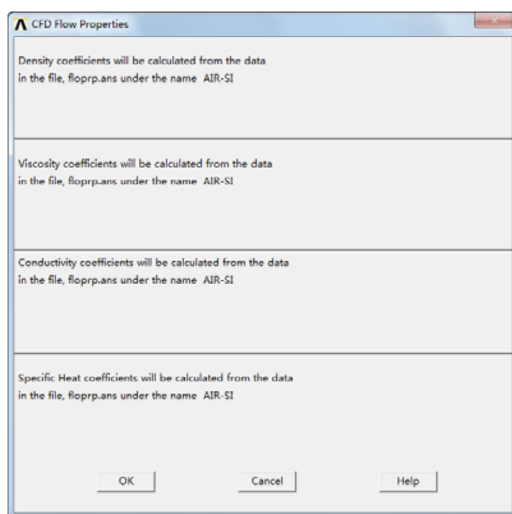



图 10-75 “CFD Flow Properties”对话框

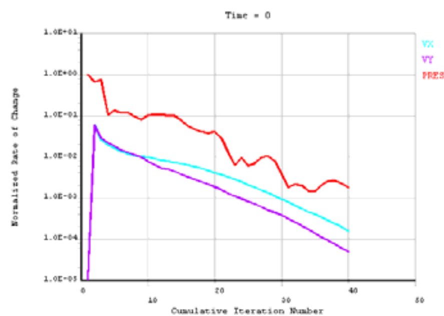



图 10-76 迭代曲线

## 10.4.4 二次前处理

**01** 设置组分属性。

❶依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，会弹出“Element Types”对话框。

❷单击“Element Types”对话框 Options 按钮，会弹出“FLUID141 element type options”对话框，如图 10-77 所示，在“Number of species K1”选择列表中选择 3，其余采用默认设置，单击“Close”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Fluid Properties，会弹出“Fluid Properties”对话框，如图 10-74 所示，在“Density”选择列表中选择“CMIX”；在“Viscosity”选择列表中选择“CMIX”；其余采用默认设置。

❹单击“OK”按钮，会弹出“CFD Flow Properties”对话框，如图 10-75 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→ Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 10-78 所示，单击“SPEC Multiple species transport？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

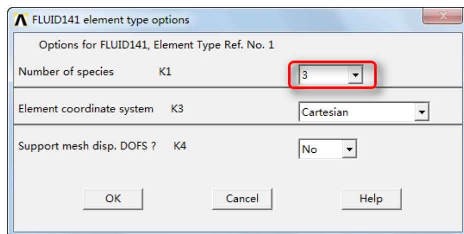



图 10-77 “FLUID141 element type options”对话框

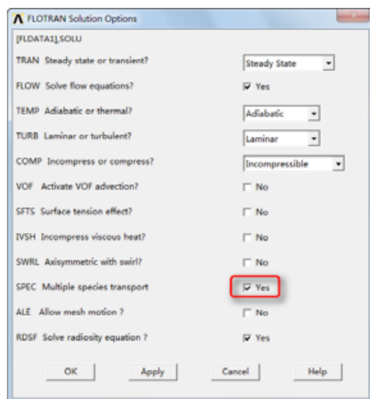



图 10-78 “FLOTRAN Solution Options”对话框

❻依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Multiple Species，会弹出“Multiple Species”对话框，如图 10-79 所示，采用默认设置。

❼单击“OK”按钮会弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #1”，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“General”。

❽单击“OK”按钮会弹出“General Species Data”对话框，如图 10-81 所示，在“NAME Species name”输入框输入 o2，在“MLWT Molecular weight”输入框输入 31.999，其余采用默认设置。

❾单击“OK”按钮会再次弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Properties”。

❿单击“OK”按钮会弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Density”。

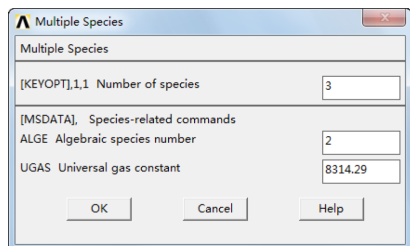



图 10-79 “Multiple Species”对话框

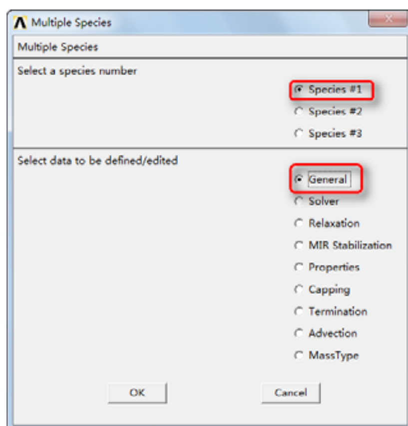



图 10-80 “Multiple Species”子对话框

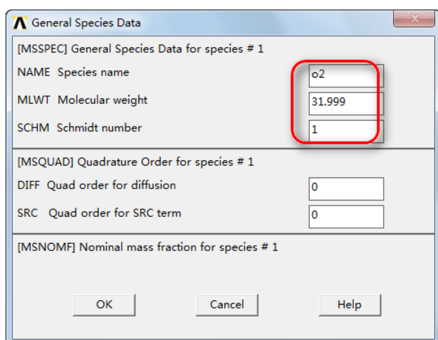



图 10-81 “General Species Data”对话框

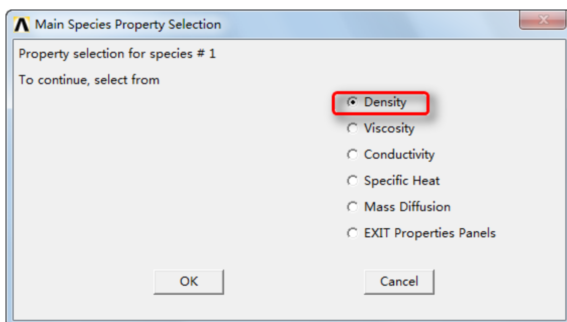



图 10-82 “Main Species Property Selection”对话框

⓫单击“OK”按钮会弹出“Species Density”对话框，如图 10-83 所示，在“TYPE Density type”输入框输入 GAS，在“NOMI Nominal value”输入框输入 1.2998，在“COF1 First coefficient”输入框输入 300，在“COF2 Second coefficient”输入框输入 1.01325e5，单击“DENV Vary density？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

⓬单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Viscosity”。

⓭单击“OK”按钮会弹出“Species Viscosity”对话框，如图 10-84 所示，在“TYPE Viscosity type”输入框输入 CONSTANT，在“NOMI Nominal value”输入框输入 1.2067e-5。

⓮单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Mass Diffusion”。

⓯单击“OK”按钮会弹出“Species Mass Diffusion Coeff”对话框，如图 10-85 所示，在“TYPE Mass diffusion type”输入框输入 CONSTANT，在“NOMI Nominal value”输入框输入 2.149e-5。

⓰单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Conductivity”。

⓱单击“OK”按钮会弹出“Species Conductivity”对话框，如图 10-86 所示，在“TYPE

Conductivity type”输入框输入 CONSTANT，在“NOMI　Nominal value”输入框输入 0.02674。

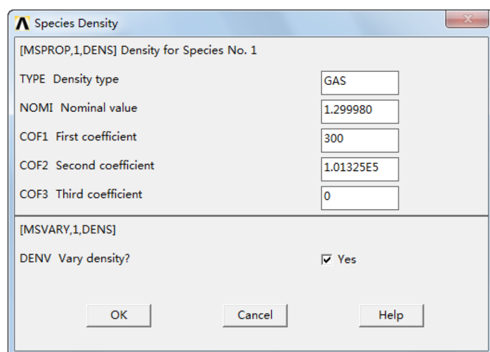



图 10-83 “Species Density”对话框

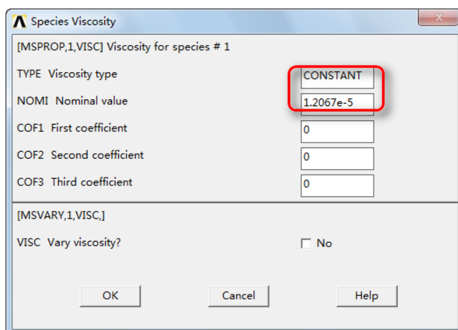



图 10-84 “Species Viscosity”对话框

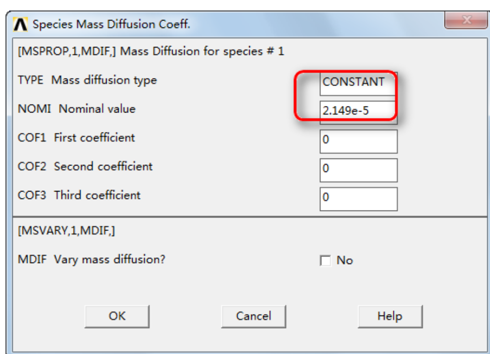



图 10-85 “Species Mass Diffusion Coeff”对话框

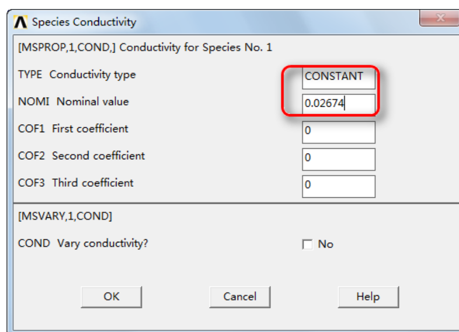



图 10-86 “Species Conductivity”对话框

⑱单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“EXIT Properties Panels”。

⑲单击“OK”按钮会再次弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #1”，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Capping”。

⑳单击“OK”按钮会弹出“Species Mass Fraction Capping”对话框，如图 10-87 所示，单击“KEY　Cap mass fraction？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

㉑单击“OK”按钮会再次弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #1”，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Relaxation”。

㉒单击“OK”按钮会弹出“Species Relaxation”对话框，如图 10-88 所示，在 CONC　Concentration relaxation 输入框输入 1，其余采用默认设置。

㉓单击“OK”按钮会弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #1”，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Solver”。

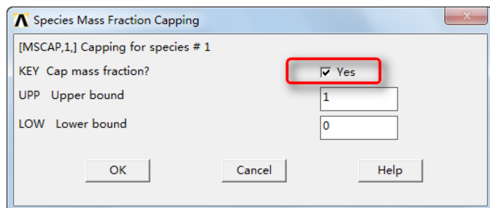



图 10-87 “Species Mass Fraction Capping”对话框

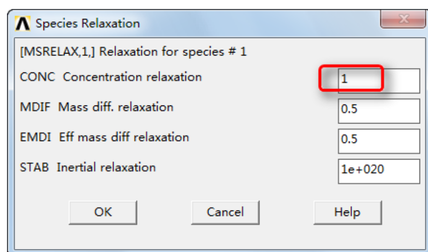



图 10-88 “Species Relaxation”对话框

㉔单击“OK”按钮会弹出“Species Solver”对话框，如图 10-89 所示，在“Options for species #1”选择列表中选择“Precond conj res”。

㉕单击“OK”按钮会弹出“Semi Dir Species”对话框，如图 10-90 所示，“NSRC No. of search vectors used”输入框输入 2，在“CONV Convergence criterion”输入框输入 1e-8。

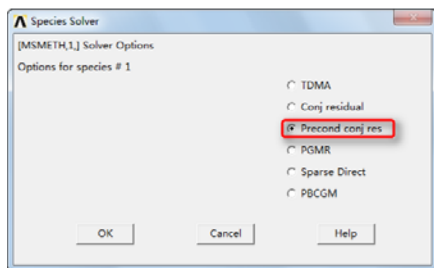



图 10-89 “Species Solver”对话框

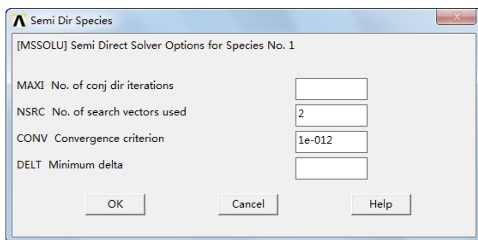



图 10-90 “Semi Dir Species”对话框

㉖单击“OK”按钮会再次弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #2”，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“General”。

㉗单击“OK”按钮会再次弹出“General Species Data”对话框，如图 10-81 所示，在“NAME Species name”输入框输入 n2，在“MLWT Molecular weight”输入框输入 28.018，其余采用默认设置。

㉘单击“OK”按钮会再次弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Properties”。

㉙单击“OK”按钮会弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Density”。

㉚单击“OK”按钮会弹出“Species Density”对话框，如图 10-83 所示，在“TYPE Density type”输入框输入 DENS，在“NOMI Nominal value”输入框输入 GAS，在“COF1 First coefficient”输入框输入 1.1381，在“COF2 Second coefficient”输入框输入 300，在“COF3 Third coefficient”输入框输入 1.01325e5，单击“DENV Vary density？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

㉛单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Viscosity”。

32单击“OK”按钮会弹出“Species Viscosity”对话框，如图 10-84 所示，在“TYPE Viscosity type”输入框输入 CONSTANT，在“NOMI Nominal value”输入框输入 1.786e-5。

33单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Mass Diffusion”。

34单击“OK”按钮会弹出“Species Mass Diffusion Coeff”对话框，如图 10-85 所示，在“TYPE Mass diffusion type”输入框输入 CONSTANT，在“NOMI Nominal value”输入框输入 1.601e-5。

35单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Conductivity”。

36单击“OK”按钮会弹出“Species Conductivity”对话框，如图 10-86 所示，在“TYPE Conductivity type”输入框输入 CONSTANT，在“NOMI Nominal value”输入框输入 0.02598。

37单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“EXIT Properties Panels”。

38单击“OK”按钮会再次弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #2”，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Capping”。

39单击“OK”按钮会弹出“Species Mass Fraction Capping”对话框，如图 10-87 所示，单击“KEY Cap mass fraction？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

40单击“OK”按钮会再次弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #3”，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“General”。

41单击“OK”按钮会再次弹出“General Species Data”对话框，如图 10-81 所示，在“NAME Species name”输入框输入 h2，在“MLWT Molecular weight”输入框输入 2.016,，其余采用默认设置。

42单击“OK”按钮会再次弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Properties”。

43单击“OK”按钮会弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Density”。

44单击“OK”按钮会弹出“Species Density”对话框，如图 10-83 所示，在“TYPE Density type”输入框输入 DENS，在“NOMI Nominal value”输入框输入 GAS，在“COF1 First coefficient”输入框输入 0.0819，在“COF2 Second coefficient”输入框输入 300，在“COF3 Third coefficient”输入框输入 1.01325e5，单击“DENV Vary density？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

45单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Viscosity”。

46单击“OK”按钮会弹出“Species Viscosity”对话框，如图 10-84 所示，在“TYPE Viscosity type”输入框输入 CONSTANT，在“NOMI Nominal value”输入框输入 8.94e-6。

㊼单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Mass Diffusion”。

㊽单击“OK”按钮会弹出“Species Mass Diffusion Coeff”对话框，如图 10-85 所示，在“TYPE　Mass diffusion type”输入框输入 CONSTANT，在“NOMI　Nominal value”输入框输入 4.964e-5。

㊾单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“Conductivity”。

㊿单击“OK”按钮会弹出“Species Conductivity”对话框，如图 10-86 所示，在“TYPE　Conductivity type”输入框输入 CONSTANT，在“NOMI　Nominal value”输入框输入 0.1815。

51单击“OK”按钮会再次弹出“Main Species Property Selection”对话框，如图 10-82 所示，在“To continue，select from”选择列表中选择“EXIT Properties Panels”。

52单击“OK”按钮会再次弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #3”，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Capping”。

53单击“OK”按钮会弹出“Species Mass Fraction Capping”对话框，如图 10-87 所示，单击“KEY　Cap mass fraction？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

54单击“OK”按钮会再次弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #3”，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Relaxation”。

55单击“OK”按钮会弹出“Species Relaxation”对话框，如图 10-88 所示，在“CONC　Concentration relaxation”输入框输入 1，其余采用默认设置。

56单击“OK”按钮会弹出“Multiple Species”子对话框，如图 10-80 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #3”，在“Select data to be defined/edited”选择列表中选择“Solver”。

57单击“OK”按钮会弹出“Species Solver”对话框，如图 10-89 所示，在 Options for species #3 选择列表中选择“Precond conj res”。

58单击“OK”按钮会弹出“Semi Dir Species”对话框，如图 10-90 所示，“NSRC　No. of search vectors used”输入框输入 2，在“CONV　Convergence criterion”输入框输入 1e-8，单击“OK”按钮会再次弹出“Multiple Species”子对话框，单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

59依次选择 Utility Menu→Select→Everything，再依次选择 Utility Menu→Plot→Lines。

02 设置组分边界条件。

❶依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L7，单击“OK”按钮关闭对话框。

❷依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Species→On Nodes，会弹出“Apply Mass Fraction”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Mass Fraction Constraints on nodes”对话框，如图 10-91 所示，在“Select a species number”选择列表中选择 Species #1。

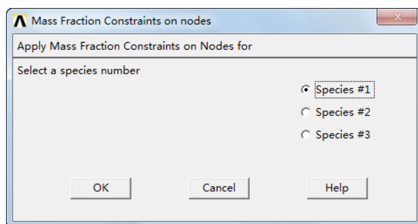



图 10-91 “Mass Fraction Constraints on nodes”对话框

❹单击“OK”按钮会弹出“Apply SPEC on nodes”对话框，如图 10-92 所示，在“O2 Load value”输入框输入 1。

❺单击“OK”按钮会弹出“Return box”对话框，如图 10-93 所示，单击“Use the same selection again？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

❻单击“OK”按钮会弹出“Mass Fraction Constraints on nodes”对话框，如图 10-91 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #2”。

❼单击“OK”按钮会弹出“Apply SPEC on nodes”对话框，如图 10-92 所示，在“N2 Load value”输入框输入 0。

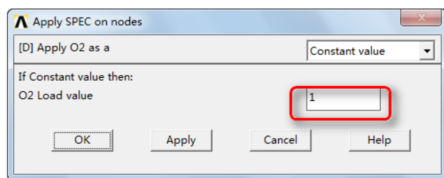



图 10-92 “Apply SPEC on nodes”对话框

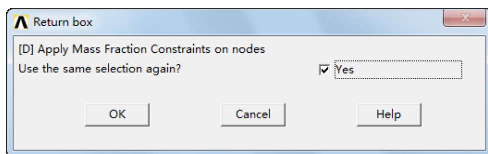



图 10-93 “Return box”对话框

❽单击“OK”按钮会弹出“Return box”对话框，如图 10-93 所示，单击“Use the same selection again？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

❾单击“OK”按钮会弹出“Mass Fraction Constraints on nodes”对话框，如图 10-91 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #3”。

❿单击“OK”按钮会弹出“Apply SPEC on nodes”对话框，如图 10-92 所示，在“H2 Load value”输入框输入 0。

⓫单击“OK”按钮会弹出“Return box”对话框，如图 10-93 所示，单击“Use the same selection again？”后的方框，使“Yes”状态变为“No”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑫依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-63 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L4，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑬依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑭依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Species→On Nodes，会弹出“Apply Mass Fraction”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Mass Fraction Constraints on nodes”对话框，如图 10-91 所示，在“Select a species number”选择列表中选择 Species #1。

⑮单击“OK”按钮会弹出“Apply SPEC on nodes”对话框，如图 10-92 所示，在“O2 Load value”输入框输入 0。

⑯单击“OK”按钮会弹出“Return box”对话框，如图 10-93 所示，单击“Use the same selection again？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

⑰单击“OK”按钮会弹出“Mass Fraction Constraints on nodes”对话框，如图 10-91 所示，在“Select a species number”选择列表中选择 Species #2。

⑱单击“OK”按钮会弹出“Apply SPEC on nodes”对话框，如图 10-92 所示，在“N2 Load value”输入框输入 1。

⑲单击“OK”按钮会弹出“Return box”对话框，如图 10-93 所示，单击“Use the same selection again？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

⑳单击“OK”按钮会弹出“Mass Fraction Constraints on nodes”对话框，如图 10-91 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #3”。

㉑单击“OK”按钮会弹出“Apply SPEC on nodes”对话框，如图 10-92 所示，在“H2 Load value”输入框输入 0。

㉒单击“OK”按钮会弹出“Return box”对话框，如图 10-93 所示，单击“Use the same selection again？”后的方框，使“Yes”状态变为“No”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉓依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Lines”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 10-64 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择线段 L9，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉔依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Lines，all”，如图 10-65 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉕依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/CFD→Species→On Nodes，会弹出“Apply Mass Fraction”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Mass Fraction Constraints on nodes”对话框，如图 10-91 所示，在“Select a species

number”选择列表中选择“Species #1”。

㉖单击“OK”按钮会弹出“Apply SPEC on nodes”对话框，如图 10-92 所示，在“O2 Load value”输入框输入 0。

㉗单击“OK”按钮会弹出“Return box”对话框，如图 10-93 所示，单击“Use the same selection again？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

㉘单击“OK”按钮会弹出“Mass Fraction Constraints on nodes”对话框，如图 10-91 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #2”。

㉙单击“OK”按钮会弹出“Apply SPEC on nodes”对话框，如图 10-92 所示，在 N2 Load value 输入框输入 0。

㉚单击“OK”按钮会弹出“Return box”对话框，如图 10-93 所示，单击“Use the same selection again？”后的方框，使“No”状态变为“Yes”。

㉛单击“OK”按钮会弹出“Mass Fraction Constraints on nodes”对话框，如图 10-91 所示，在“Select a species number”选择列表中选择“Species #3”。

㉜单击“OK”按钮会弹出“Apply SPEC on nodes”对话框，如图 10-92 所示，在 H2 Load value 输入框输入 1。

㉝单击“OK”按钮会弹出“Return box”对话框，如图 10-93 所示，单击“Use the same selection again？”后的方框，使“Yes”状态变为“No”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉞依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 10-72 所示，在“EXEC Global iterations”输入框中输入 20，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉟依次选择 Main Menu→Preprocessor→FLOTRAN Set Up→Additional Out→Print Controls，会弹出“FLOTRAN Print Control”对话框，如图 10-94 所示，在“OUTP Convergence monitor mode”选择列表中选择“Landscape”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

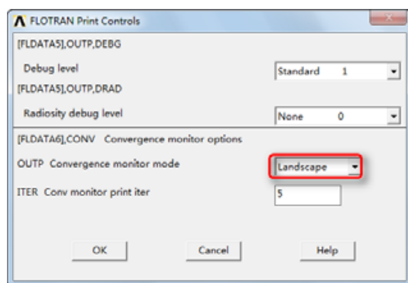



图 10-94 FLOTRAN Print Control 对话框

## 10.4.5 二次求解

❶依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 10-95 所示。

❷依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出

“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 10-96 所示，单击“FLOW Solve flow equation？”后的方框，使“Yes”状态变为“No”；在“TEMP Adiabatic or thermal？”选择列表中选择“Thermal”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

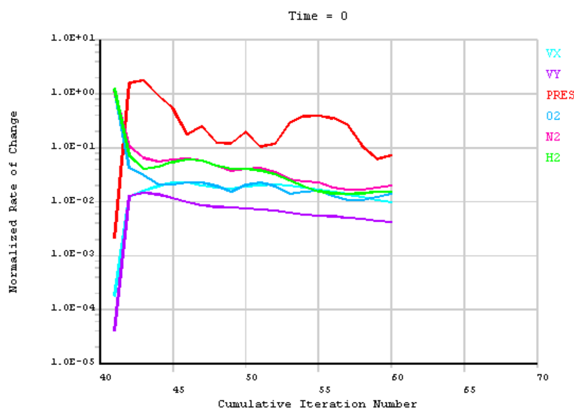



图 10-95 迭代曲线

❸依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→CFD Solver Controls→TEMP Solver CFD，会弹出“TEMP Solver CFD”对话框，如图 10-97 所示，在“Solver”选择列表中选择“Precond conj res”。

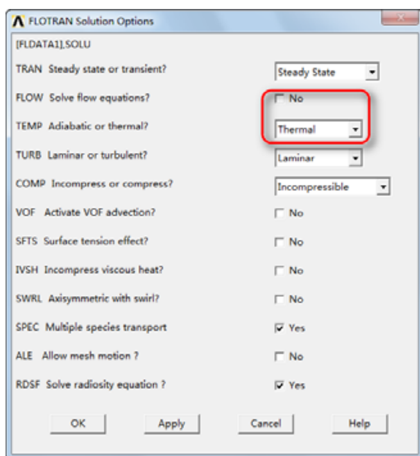



图 10-96 “FLOTRAN Solution Options”对话框

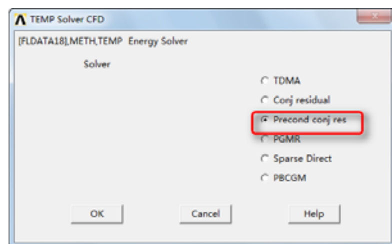



图 10-97 “TEMP Solver CFD”对话框

❹单击“OK”按钮会弹出“Semi Direct Solver Options for Energy”对话框，如图 10-98 所示，在“Convergence criterion”输入框输入 1e-10，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 10-72 所示，在“EXEC Global iterations”输入框中输入 5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Relax/Stab/Cap→DOF

Relaxation，会弹出 DOF Relaxation 对话框，如图 10-99 所示，在“TEMP Temperature relaxation”输入框输入 1，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

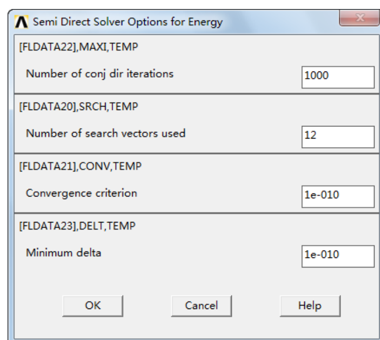



图 10-98 Semi Direct Solver Options for Energy 对话框

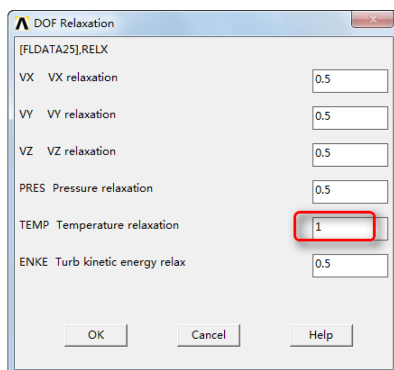



图 10-99 DOF Relaxation 对话框

❼依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 10-100 所示。

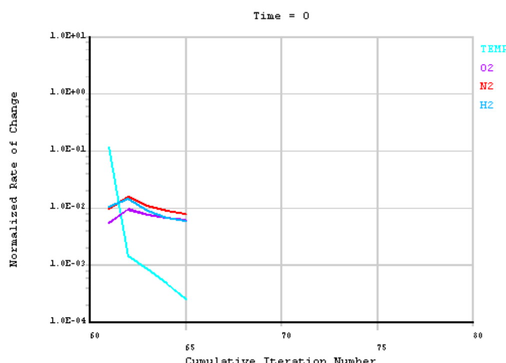



图 10-100 迭代曲线

❽依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Solution Options，会弹出“FLOTRAN Solution Options”对话框，如图 10-96 所示，单击 FLOW Solve flow equation? 后的方框，使“No”状态变为“Yes”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮

关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 10-72 所示，在“EXEC Global iterations”输入框中输入 35，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❿依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 10-101 所示。

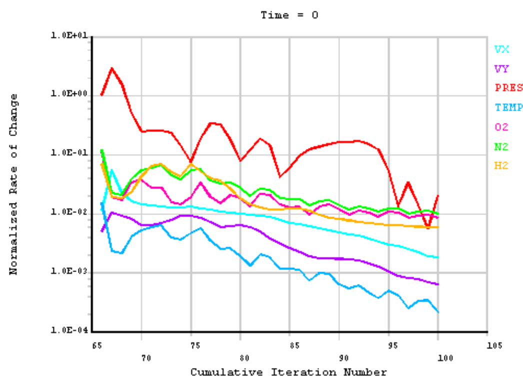



图 10-101 迭代曲线

⓫依次选择 Main Menu→Solution→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl 命令，会弹出“Steady State Control Settings”对话框，如图 10-72 所示，在“EXEC Global iterations”输入框中输入 50，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓬依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN 命令，求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。迭代曲线如图 10-102 所示。

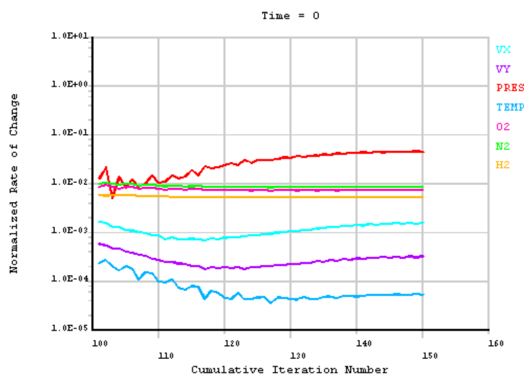



图 10-102 迭代曲线

## 10.4.6 后处理

❶读入计算结果，依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

❷依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 10-103 所示。

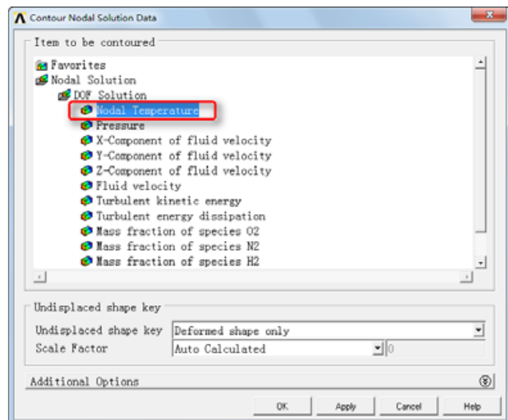



图 10-103 “Contour Nodal Solution Data”对话框

❸在“Item to be contoured”列表中，选择 Nodal Solution→DOF Solution→Nodal Temperature，单击“OK”按钮，“ANSYS”窗口将显示如图 10-104 所示的温度场分布等值线图。

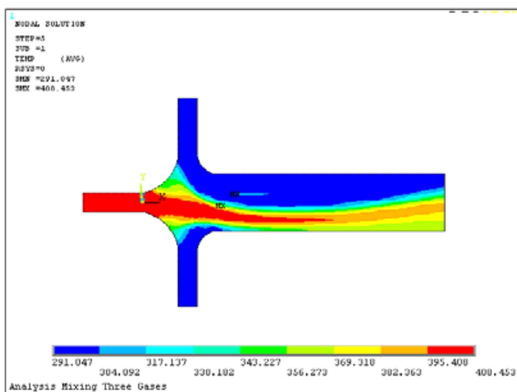



图 10-104 温度场分布等值线图

❹在“Item to be contoured”列表中，选择 Nodal Solution→DOF Solution→Pressure，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 10-105 所示的压力场分布等值线图。

❺在“Item to be contoured”列表中，选择 Nodal Solution→DOF Solution→Fluid velocity，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 10-106 所示的速度场分布等值线图。

❻依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operations→Define Path→By Nodes，会弹出“By Nodes”对话框，用鼠标选择模型右边边界上下两个节点（即 K14 和 K15）。

❼单击“OK”按钮会弹出“By Nodes”对话框，如图 10-107 所示，“Name Define Path Name”输入框输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

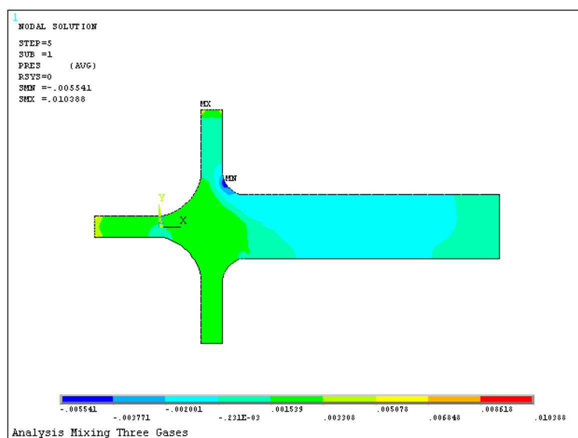



图 10-105 压力场分布等值线图

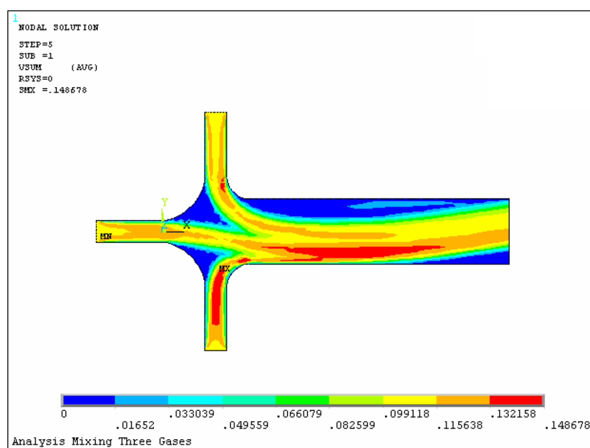



图 10-106 速度场分布等值线图

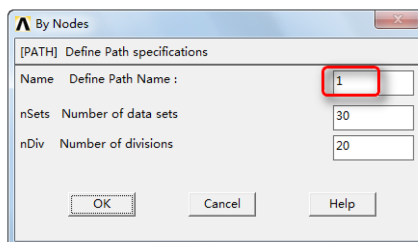



图 10-107 By Nodes 对话框

❽依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operations→Map onto Path，会弹出“Map Result Items onto Path”对话框，如图 10-108 所示，在“Item，Comp Item to be mapped”后选择“DOF solution→TEMP”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→General PostProc→Path Operations→Plot Path Item→On Graph，会弹出“Plot of Path Items on Graph”对话框，如图 10-109 所示，在“Lab1-6 Path

items to be graphed”选择列表中选择“TEMP”。

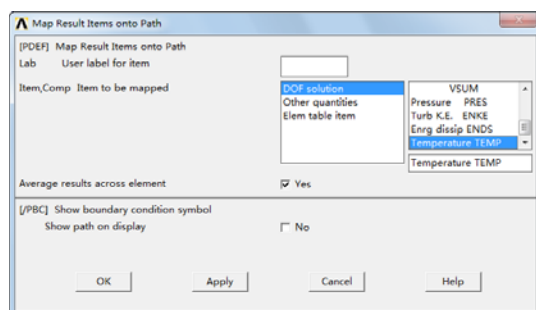



图 10-108 “Map Result Items onto Path”对话框

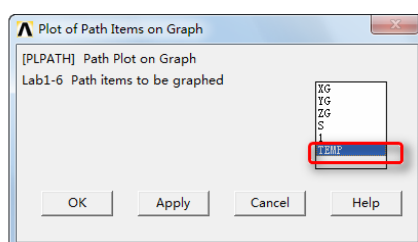



图 10-109 “Plot of Path Items on Graph”对话框

⑩单击“OK”按钮， ANSYS 窗口将显示如图 10-110 所示的右边边界的温度变化曲线。

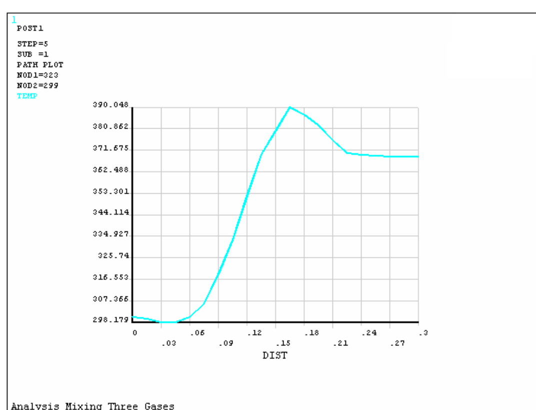



图 10-110 右边边界温度变化曲线

## 10.4.7 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

# 第 11 章

# 声学分析及实例

通过谐响应分析可以解决许多声学问题。谐响应分析可以求解由流固面上的谐波载荷引起的流体压力场分布。通过设置载荷的频率范围，可以观察到不同频率下的压力分布。

本章主要是耦合声学分析，不仅从理论上作了简单的分析，也要给出多个工程实例，以方便读者更深刻地理解。

## 学习要点

- 了解声学分析的基本步骤；
- 通过实例加深对声学分析的理解

# 11.1 声学分析步骤

通过谐响应分析可以解决许多声学问题。谐响应分析可以求解由流体固体面上的谐波载荷引起的流体压力场分布。通过设置载荷的频率范围，可以观察到不同频率下的压力分布。另外，解决声学问题还可以采用模态和瞬态声学分析。

谐波声学分析主要包括以下三个步骤：

1）建立模型；

2）划分网格；

3）设置边界条件并计算。

## 11.1.1 建立模型

在建模的步骤中，需要定义文件名和分析标题，然后在 PREP7 预处理（PREP7 preprocessor）中定义单元类型（element types）、单元常量（element real constants）、材料属性（material properties）和模型几何尺寸（model geometry）。

对于谐波声学分析，需要考虑以下几点：

（1）单元类型　在谐波声学分析中有 4 种单元类型：FLUID29、FLUID30、FLUID129 和 FLUID130。其中 FLUID29 和 FLUID129 用于二维平面模型，FLUID30 和 FLUID130 用于三维模型。

FLUID29 单元类型用于模拟流体介质和流固界面的相互作用，主要应用于声学传播和结构动力学问题。声学的二维波动方程考虑了界面上的声压力和结构运动的影响因素。FLUID29 单元的几何形状、节点位置和坐标系如图 11-1 所示。

FLUID29 单元的限制：

1）单元的面积必须是正的。

2）单元必须位于 XY 面内，如图 11-1 所示。

3）单元必须有 4 个节点，三角形单元可以将节点 K 和 L 重合，如图 11-1 所示。

FLUID29 单元的假设：

1）流体是可压缩的（密度随压力的不同而变化）。

2）流体无粘度（忽略粘度引起的耗散影响）。

3）平均密度和压力是在流体中相同的。

FLUID30 单元类型用于模拟流体介质和流固界面相互作用，主要应用于声学传播和结构动力学问题。声学的三维波动方程考虑了界面上的声压力和结构运动的影响因素。FLUID30 单元的几何形状、节点位置和坐标系如图 11-2 所示。

FLUID30 单元的限制：

1）单元中不能有为零的体积。

2）单元节点可以被编号，也可以用节点号表示平面。

3）单元不能被扭曲。如果被扭曲，单元节点的顺序将被打乱。

4）所有单元上必须有 8 个节点，棱柱体或四面体单元可以重复节点。

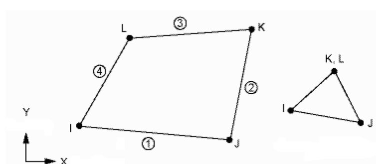


图 11-1 FLUID29 单元的几何模型

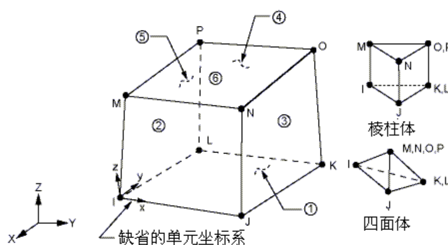



图 11-2 FLUID30 单元的几何模型

FLUID129 和 FLUID130 单元类型分别是 FLUID29 和 FLUID30 单元类型的发展，FLUID129 和 FLUID130 单元的几何形状，节点位置和坐标系分别如图 11-3 和 11-4 所示。

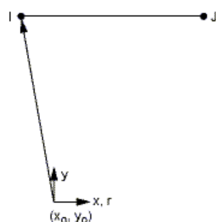


图 11-3 FLUID129 单元的几何模型

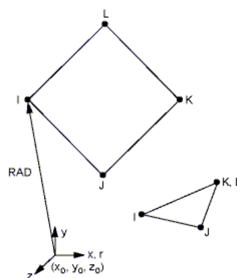



图 11-4 FLUID130 单元的几何模型

（2）材料属性　声波单元需要密度（DENS）和音速（SONC）作为材料属性，其中 FLUID129 和 FLUID130 只需要音速。如果在流固界面存在声音吸收，则可以用 MU 来设置边界条件 $\beta$（吸收系数）。$\beta$ 的值通常可以从实验中测得。对于结构单元类型需要设置杨氏模量（EX）、密度（DENS）和泊松比（PRXY 或 NUXY）。

（3）单元常量　当使用 FLUID129 和 FLUID130 单元类型时，有限元单元网格的边界必须是圆形（平面和轴对称）或球形（三维）的，并且有限区域内圆形或球形的半径必须设置为常数 RAD，如图 11-5 所示。圆形或球形的中心点通常也被设为常数。

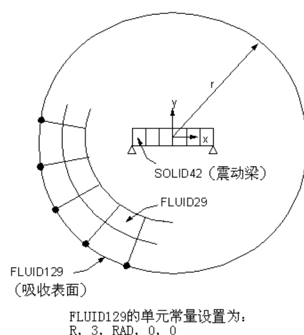



图 11-5 吸收单元的应用

## 11.1.2 划分网格

典型的划分网格的过程如下：

01 圆形或球形边界上采用 FLUID29 单元类型在内部流动区域划分网格，如图 11-6 所示。

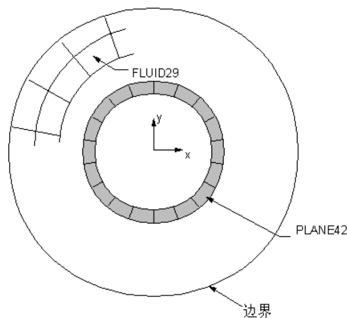


图 11-6 划分流动网格

02 生成声波单元。

❶选择圆形或球形边界上的节点，方法如下：

命令：NSEL

菜单：Utility Menu→Select→Entities

❷指定 FLUID129 和 FLUID29 为流体单元类型，方法如下：

命令：TYPE

REAL

菜单：Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs

Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete

生成边界上的吸收单元，方法如下：

命令：ESURF

菜单：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Inf Acoustic

❸指定流固界面，步骤如下：

a．选取界面上所有的节点，方法如下：

命令：NSEL

菜单：Utility Menu→Select→Entities

b．选取与节点相关的流体单元，方法如下：

命令：ESEL

菜单：Utility Menu→Select→Entities

c．指定选取节点为流固界面节点，方法如下：

命令：SF

菜单：Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid-Struct Intr→On Nodes


在求解之前必须重新选择所有的节点。

## 11.1.3 设置边界条件并计算

在设置边界条件并计算的步骤中，需要定义分析类型和选项、设置载荷、指定载荷选项并开始有限元求解，下面将作更为具体的解释。

❶进入求解（SOLUTION）处理器。可以利用以下方法进入求解处理器：

命令：/SOLU

菜单：Main Menu→Solution

❷定义分析类型。可以利用以下方法设置分析类型：

命令：ANTYPE，HARMIC

菜单：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis

❸设置分析选项。可以利用以下方法设置：

命令：HROPT

菜单：Main Menu→Solution→Analysis Options

可以利用以下方法设置求解列表格式：

命令：HROUT

菜单：Main Menu→Solution→Analysis Options

可以利用以下方法设置求解方程器：

命令：EQSLV

菜单：Main Menu→Solution→Analysis Options

在这里，可以选择正面求解（默认）、稀疏直接求解（SPARSE）、雅可比共轭梯度求解（JCG）或不完全共轭梯度求解（ICCG）。ANSYS 建议采用 JCG 法求解。

❹施加载荷。谐波分析假设所有载荷的谐波都与时间有关。为了在声学分析中指定谐波载荷，通常需要两个参数：振幅和强迫频率。振幅载荷的设置所需要的命令见表 11-1。强迫频率可以利用以下方法来设置：

命令：HARFRQ

菜单：Main Menu→Solution→Time/Frequenc→Freq & Substeps

表 11-2 中给出了谐波声学分析中几乎所有的载荷及设置载荷的命令。注意，对于固体模型或有限元模型，除了惯性载荷外，可以定义任何载荷。

表 11-1 声学分析的载荷设置命令

<table>
<tr><th>载荷类型</th><th>实体模型或FE</th><th>实体</th><th>设置</th><th>删除</th><th>列表</th><th>操作</th><th>施加设置</th></tr>
<tr><td rowspan="4">位移<br>压力</td><td>实体模型</td><td>点</td><td>DK</td><td>DKDELE</td><td>DKLIST</td><td>DTRAN</td><td>–</td></tr>
<tr><td>实体模型</td><td>线段</td><td>DL</td><td>DLDELE</td><td>DLLIST</td><td>DTRAN</td><td>–</td></tr>
<tr><td>实体模型</td><td>面</td><td>DA</td><td>DADELE</td><td>DALIST</td><td>DTRAN</td><td>–</td></tr>
<tr><td>有限元</td><td>节点</td><td>D</td><td>DDELE</td><td>DLIST</td><td>DSCALE</td><td>DCUM</td></tr>
<tr><td rowspan="2">力<br>动量</td><td>实体模型</td><td>点</td><td>FK</td><td>FKDELE</td><td>FKLIST</td><td>FTRAN</td><td>–</td></tr>
<tr><td>有限元</td><td>节点</td><td>F</td><td>FDELE</td><td>FLIST</td><td>FSCALE</td><td>FCUM</td></tr>
<tr><td rowspan="4">压力<br>阻抗<br>边界<br>流固<br>耦合</td><td>实体模型</td><td>线段</td><td>SFL</td><td>SFLDELE</td><td>SFLLIST</td><td>SFTRAN</td><td>SFGRAD</td></tr>
<tr><td>实体模型</td><td>面</td><td>SFA</td><td>SFADELE</td><td>SFALIST</td><td>SFTRAN</td><td>SFGRAD</td></tr>
<tr><td>有限元</td><td>节点</td><td>SF</td><td>SFDELE</td><td>SFLIST</td><td>SFSCALE</td><td>SFCUM,<br>SFGRAD</td></tr>
<tr><td>有限元</td><td>单元</td><td>SFE</td><td>SFEDELE</td><td>SFELIST</td><td>SFSCALE</td><td>SFBEAM<br>SFCUM,<br>SFFUN,<br>SFGRAD</td></tr>
<tr><td>惯性</td><td>–</td><td>–</td><td>ACEL, CGLOC ，CGOMA， DCGOG，OMEGA， DOMEA，IRLF</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td><td></td></tr>
</table>

❺设置载荷步长选项。表 11-3 给出了谐波分析的载荷步长的设置。

表 11-2 声学分析的载荷设置

| 载荷类型 | 种类 | 命令 | 菜单 |
|---|---|---|---|
| 位移（UX，UY，UZ）、压力（PRES） | 约束载荷 | D | Main Menu→Preprocessor→DefineLoads→Apply→Structural→Displacement or Potential<br>Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement |
| 力（FX，FY，FZ）、动量（MX，MY，MZ）、流动载荷 | 力载荷 | F | Main Menu→Preprocessor→Define Loads→Apply→Force/Moment<br>Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Force/Moment |
| 压力（PRES）、阻抗（IMPD）、流固耦合（FSI） | 表面载荷 | SF | Main Menu→Preprocessor→Define Loads→Apply→load type<br>Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→load type |
| 重力等 | 惯性载荷 | ACEL<br>OMEGA<br>DOMEGA<br>CGLOC<br>CGOMGA<br>DCGOMG<br>IRLF | Main Menu→Preprocessor→Define Loads→Apply→load type<br>Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→load type |

表 11-3 声学分析的载荷步长设置

| 选项 | 命令 | 菜单 |
|---|---|---|
| 动力学选项 | | |
| 强迫频率范围 | HARFRQ | Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Freq & Substeps |
| 一般选项 | | |
| 求解声波数 | NSUBST | Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Freq & Substeps |
| 步长载荷 | KBC | Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Freq & Substeps |
| 输出控制 | | |
| 输出控制 | OUTPR | Main Menu→Solution→Output Ctrls→Solu Printout |
| 数据和结果输出 | OUTRES | Main Menu→Solution→Output Ctrls→DB/Results File |
| 结果的推断 | ERESX | Main Menu→Solution→Output Ctrls→Integration Pt |

❻备份数据。可以利用以下方法保存要备份的数据：

命令：SAVE

菜单：Utility Menu→File→Save as

❼设置附加载荷。如果打算设置附加载荷，可以重复步骤❺和❻。

❽完成求解。可以利用以下方法求解以及完成求解：

命令：SOLVE

菜单：Main Menu→Solution→Solve→Current LS

命令：FINISH

菜单：Main Menu→Finish

# 11.2 流固耦合声学分析

## 11.2.1 问题描述

在这个问题中，首先要确定浸没在水中环的弯曲型频率。通过在 34～38Hz 之间进行频率扫描，可以完成谐波分析。环的中心到无限单元的距离至少等于

$$L=\left(D/2\right)+0.2\lambda$$

式中，$D$ 是环的外直径；$\lambda$ 是压力波的主波长，$\lambda=c/f$。

当外半径 $r=D/2=0.26035$、音速 $c=1460$ 以及主频率 $f=36$Hz 时，将它们代入式（1）中，则环的中心到无限单元的距离等于

$$L=\left(D/2\right)+0.2\lambda=0.26035+0.2\times1460/36=8.37146$$

然而，当通过声学有限元分析时，环的中心到无限单元的距离会远远大于所需距离，并且环的外半径为 0.5207。图 11-7 所示是分析的几何模型示意图。

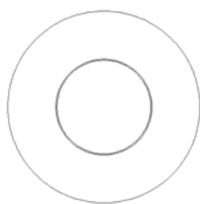


图 11-7 几何模型示意图

图中，三个圆的直径由小到大分别分别为：$D_1=0.508$、$D_2=0.5207$ 和 $D_3=1.0414$。

## 11.2.2 前处理

**01 定义工作名和工作标题。**

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“Acoustic Analysis”，并将“NEW log and error files？”设置为“Yes”，如图 11-8 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

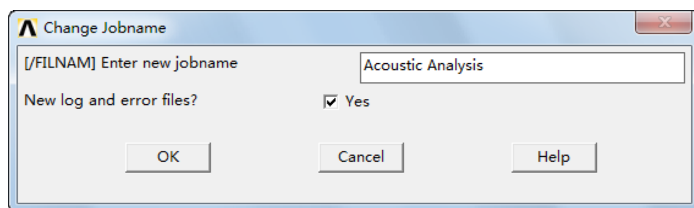



图 11-8 “Change Jobname”对话框

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”

对话框，在对话框中输入工作标题“Fluid-Structure Coupled Acoustic Analysis”，如图 11-9 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

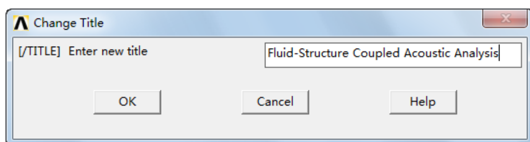



图 11-9 “Change Title”对话框

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择 Structural、ANSYS Fluid 和 FLOTRAN CFD，如图 11-10 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

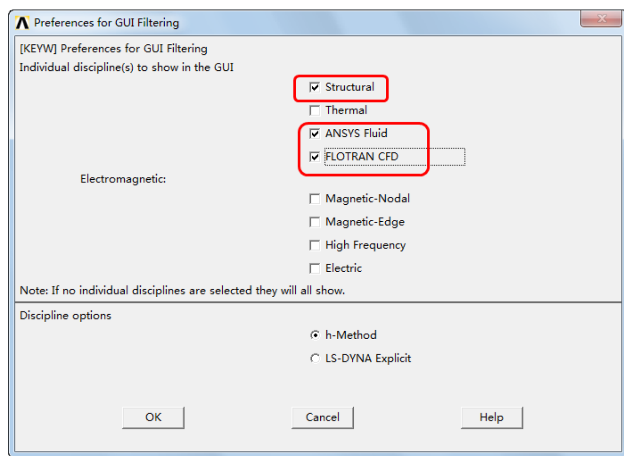



图 11-10“Preferences for GUI Filtering”对话框

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，会弹出“Element Types”对话框，如图 11-11 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择 Structural Solid 和 Quad 4node 182，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 11-12 所示。

❹单击“Apply”按钮会再次弹出“Library of Element Types”对话框，如图 11-12 所示，在“Library of Element Types”列表框中选择 ANSYS Fluid 和 2D acoustic 29，在“Element type reference number”输入框中输入 2。

❺单击“Apply”按钮会再次弹出“Library of Element Types”对话框，如图 11-12 所示，在“Library of Element Types”列表框中选择 ANSYS Fluid 和 2D acoustic 129，在“Element type reference number”输入框中输入 3。

❻单击“Apply”按钮会再次弹出“Library of Element Types”对话框，如图 11-12 所示，在“Library of Element Types”列表框中选择 ANSYS Fluid 和 2D acoustic 29，在“Element type reference number”输入框中输入 4，单击“OK”按钮关闭“Library of Element

Types”对话框。

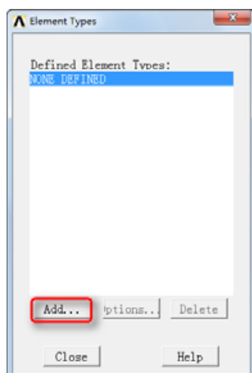



图 11-11 “Element Types”对话框

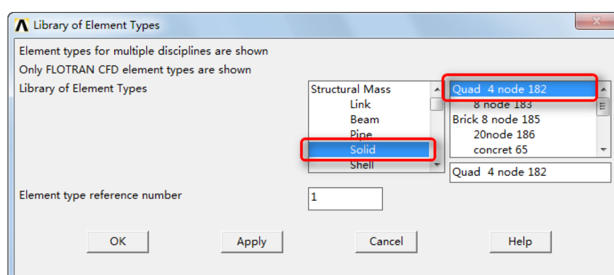



图 11-12 “Library of Element Types”对话框

❼设置完成之后“Element Types”对话框如图 11-13 所示。选取“Element Types”对话框中的“Type 4 FLUID29”，单击“Options”按钮，会弹出“FLUID29 element type options”对话框，如图 11-14 所示，在“Structure at elem interface K2”选择列表中选择“Structure absent”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

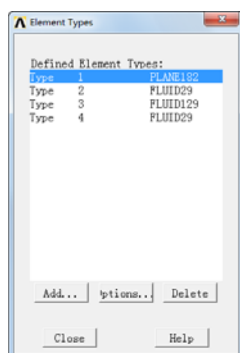



图 11-13 设置完成后单元类型对话框

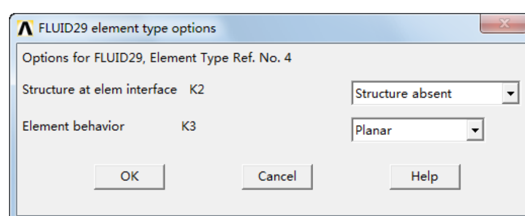



图 11-14 “FLUID29 element type options”对话框

❽单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

**03** 定义单元常量。

❶依次选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete，会弹出“Real Constants”对话框，单击“Add”按钮，会弹出“Element Type for Real Constants”对话框，如图 11-15 所示，用鼠标选择“Type 3 FLUID129”。

❷单击“OK”按钮，会弹出“Real Constant Set Number 1，for FLUID129”对话框，如图 11-16 所示，在“Real Constant Set No.”输入框输入 3，在“Radius RAD”输入框输入 0.5207，在“Center X，Y”输入框分别输入 0，0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。

**04** 定义材料属性。

❶依次选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，会弹出“Define Material Model Behavior”对话框，如图 11-17 所示。

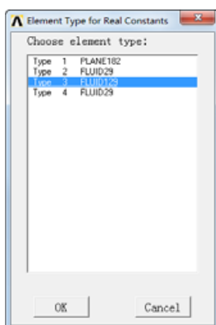



图 11-15 “Element Type for Real Constants”对话框

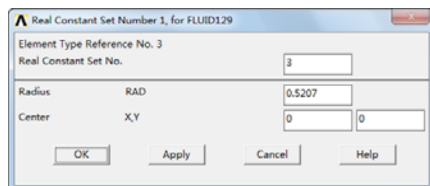



图 11-16 “Real Constant Set Number 1，for FLUID129”对话框

❷在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Structural→Linear→Elastic→Orthotropic，会弹出“Linear Orthotropic Properties for Material”对话框，如图 11-18 所示，单击“Choose Poisson’s Ratio”按钮会弹出下拉菜单，选择“Minor_Nu”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

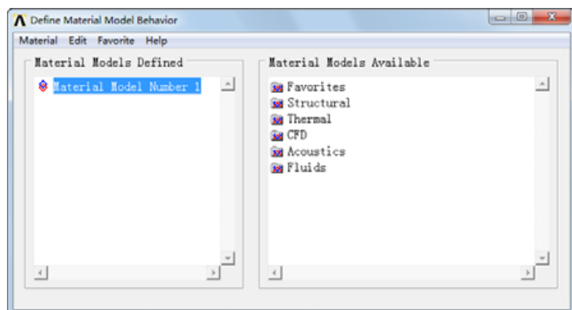



图 11-17 “Define Material Model Behavior”对话框

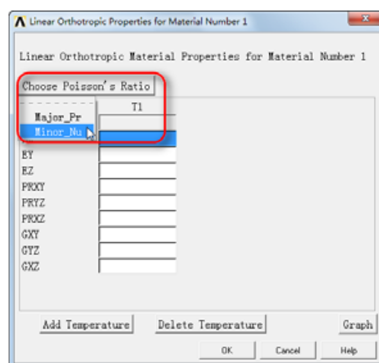



图 11-18 “Linear Orthotropic Properties for Material”对话框

❸在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，会弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number1”对话框，如图 11-19 所示，在“EX”输入框输入 2.068e11，在“NUXY”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❹在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Structural→Density，会弹出“Density for Material Number 1”对话框，如图 11-20 所示，在“DENS”输入框输入 7929，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺单击“Define Material Model Behavior”对话框菜单栏中 Material→New Model，会弹出“Define Material ID”对话框，如图 11-21 所示，在“Define Material ID”输入框输入 2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

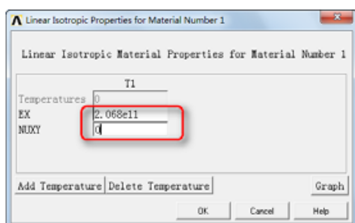


图 11-19 “Linear Isotropic Properties for Material Number1”对话框

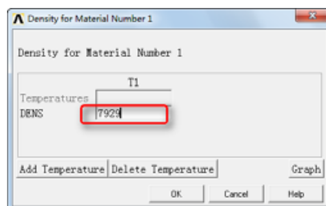


图 11-20 “Density for Material Number 1”对话框

❻依次选择 Material Models Defined→Material Model Number 2，再在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Acoustics→Density，会弹出“Density for Material Number 2”对话框，如图 11-22 所示，在“DENS”输入框输入 1030，单击“OK”按钮关闭该对话框。

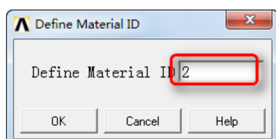


图 11-21 “Define Material ID”对话框

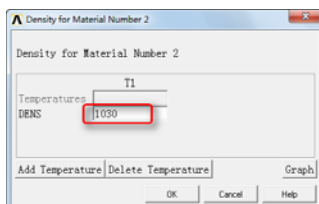


图 11-22 “Density for Material Number 2”对话框

❼在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Acoustics→Sonic Velocity，会弹出“Sonic Velocity for Material Number 2”对话框，如图 11-23 所示，在“SONC”输入框输入 1460，单击“OK”按钮关闭该对话框。

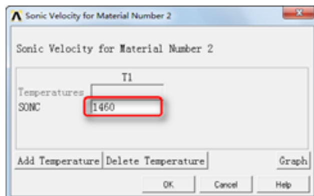


图 11-23 “Sonic Velocity for Material Number 2”对话框

❽在“Define Material Model Behavior”对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

**05** 建立几何模型。

❶依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Partial Annulus，会弹出“Part Annular Circ Area”对话框，如图 11-24 所示，在“WP X”输入框输入 0，在“WP Y”输入框输入 0，在“Rad-1”输入框输入 0.254，在“Thera-1”输入框输入 0，在“Rad-2”输入框输入 0.26035，在“Thera-2”输入框输入 90。

❷单击“Apply”按钮会再次弹出“Part Annular Circ Area”对话框，如图 11-24 所示，在“WP X”输入框输入 0，在“WP Y”输入框输入 0，在“Rad-1”输入框输入 0.26035，在“Thera-1”输入框输入 0，在“Rad-2”输入框输入 0.5207，在“Thera-2”输入框

入 90，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，单击“LINE Line numbers”后的方框，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，如图 11-25 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

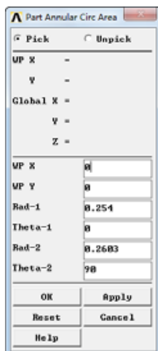



图 11-24 “Part Annular Circ Area”对话框

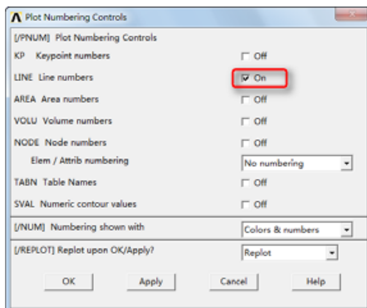



图 11-25 “Plot Numbering Controls”对话框

❹依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗口将变成白色。依次选择 Utility Menu→Plot→Areas 将显示所生成的几何模型，生成的几何模型如图 11-26 所示。

❺单击 ANSYS 工具条的“SAVE_DB”按钮保存数据。

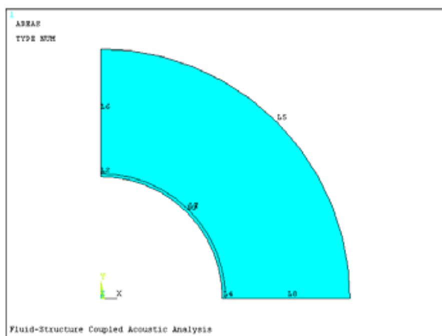



图 11-26 生成的几何模型（1/4）

**06 划分网格。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，如图 11-25 所示，单击“AREA Area numbers”后的方框，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Areas”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 11-27 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Entities”对话框，选择面 A1，单击“OK”按钮关闭对话框。

❹依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas，会

弹出“Area Attributes”对话框，单击“Pick All”按钮会弹出“Area Attributes”对话框，如图 11-28 所示，在“MAT Material number”选择列表中选择 1，在“TYPE Element type number”选择列表中选择“1 PLANE182”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

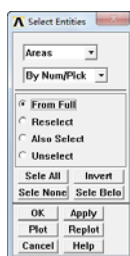



图 11-27 “Select Entities”对话框

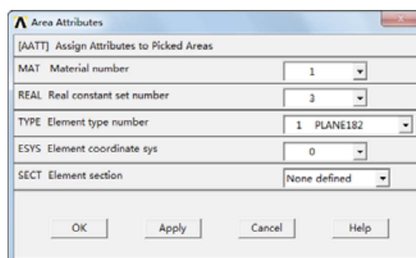



图 11-28 “Area Attributes”对话框

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on Picked Lines”对话框，用鼠标选择线段 L1 和 L3。



在选择线段 L1 时，会弹出“Multiple_Entities”对话框，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻单击“OK”按钮会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 11-29 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 16，在“SPACE Spacing ratio”输入框输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

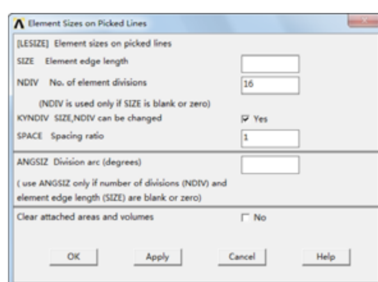



图 11-29 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on Picked Lines”对话框，用鼠标选择线段 L2 和 L4。

❽单击“OK”按钮会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 11-29 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 1，在“SPACE Spacing ratio”输入框输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided，会弹出“Mesh Areas”对话框，单击“Pick All”按钮划分网格并关闭该对话框。

❿依次选择 Utility Menu→Select→Everything，依次选择 Utility Menu→Plot→Areas。

⓫依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Areas”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，如图 11-27 所示，单击“OK”按钮，会弹出“Select Lines”对话框，选择面 A2，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓬依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas，会弹出“Area Attributes”对话框，单击“Pick All”按钮会弹出“Area Attributes”对话框，如图 11-28 所示，在“MAT　Material number”选择列表中选择“2”，在“TYPE　Element type number”选择列表中选择“2　FLUID29”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓭依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on Picked Lines”对话框，用鼠标选择线段 L5 和 L7。



在选择线段 L7 时，会弹出“Multiple_Entities”对话框，单击“Next”按钮，然后单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓮单击“OK”按钮会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 11-29 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 16，在“SPACE　Spacing ratio”输入框输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓯依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on Picked Lines”对话框，用鼠标选择线段 L6 和 L8。

⓰单击“OK”按钮会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 11-29 所示，在“NDIV　No. of element divisions”输入框输入 5，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓱依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided，会弹出“Mesh Areas”对话框，单击“Pick All”按钮划分网格并关闭该对话框。生成网格后的几何模型如图 11-30 所示。

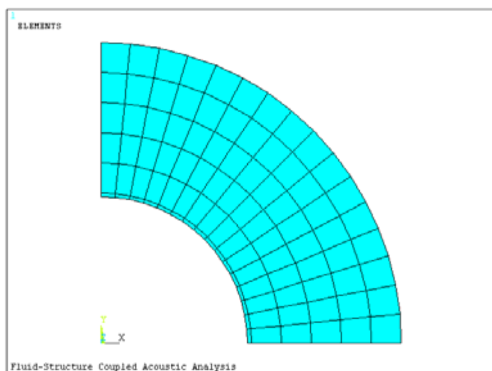



图 11-30 生成网格后的几何模型（1/4）

⓲依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Nodes，会弹出“Reflect

Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Reflect Nodes”对话框，如图 11-31 所示，在“Ncomp　Plane of symmetry”选择列表中选择“Y-Z plane　X”，在“INC　Node number increment”输入框输入 1000，单击“OK”按钮关闭该对话框。

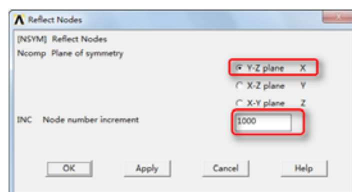



图 11-31 “Reflect Nodes”对话框

⑲依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Elements→Auto Numbered，会弹出“Reflect Elems Au…”对话框，单击“Pick All”按钮会弹出“Reflect Elems Auto-Num”对话框，如图 11-32 所示，在“NINC　Node no. Increment”输入框输入 1000，单击“OK”按钮关闭该对话框。

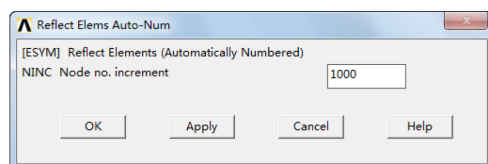



图 11-32 “Reflect Elems Auto-Num”对话框

⑳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Nodes，会弹出“Reflect Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Reflect Nodes”对话框，如图 11-31 所示，在“Ncomp　Plane of symmetry”选择列表中选择“X-Z plane　Y”，在“INC　Node number increment”输入框输入 2000，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉑依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Elements→Auto Numbered，会弹出“Reflect Elems Au…”对话框，单击“Pick All”按钮会弹出“Reflect Elems Auto-Num”对话框，如图 11-32 所示，在“NINC　Node no. Increment”输入框输入 2000，单击“OK”按钮关闭该对话框。

㉒依次选择 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Merge Items，会弹出“Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框，如图 11-33 所示，在“Label Type of item to be merge”选择列表中选择“All”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

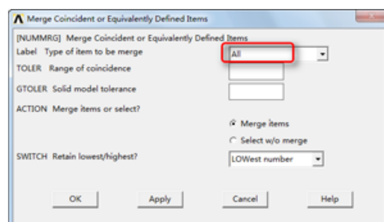



图 11-33 “Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框

㉓依次选择 Utility Menu→Plot→Elements，ANSYS 窗口会显示生成网格后的模型，如图 11-34 所示。

**07 修改单元类型。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框。在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“By Attributes”，在第三个单选框中选择“Elem type num”，在“Min，Max，Inc”输入框输入 1，如图 11-35 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❷依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Elements”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Nodes”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Elements”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Nodes”，在第四个单选框中选择 Unselect，

单击“Invert”按钮，在单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

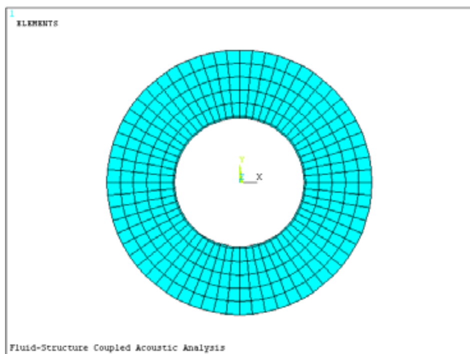



图 11-34 生成网格后的几何模型

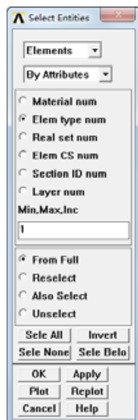



图 11-35 “Select Entities”对话框

❻依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Elements”，在第四个单选框中选择“From Full”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move / Modify→Elements→Modify Attrib，会弹出“Modify Elem Attr…”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Modify

Elem Attributes”对话框，如图 11-36 所示，在“STLOC　Attributes to change”选择列表中选择“Elem type　TYPE”，在“I1　New attribute number”输入框输入 4，单击“OK”按钮关闭该对话框。

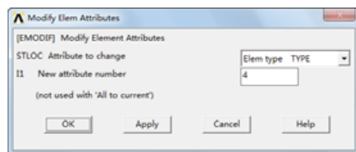



图 11-36 “Modify Elem Attributes”对话框

❽依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，单击“Sele All”按钮，单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，单击“Sele All”按钮，再单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

**08** 定义 e1129 的线单元。

❶依次选择 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cylindrical，将直角坐标系改为圆柱坐标系。

❷依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框输入 0.5207，单击“OK”按钮关闭该对话框

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs，会弹出“Meshing Attributes”对话框，如图 11-37 所示，在“TYPE　Element type number”选择列表中选择“3　FLUID129”，在“MAT　Material number”选择列表中选择“2”，在“REAL　Real constant set number”选择列表中选择“3”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

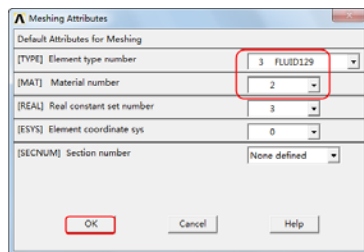



图 11-37 Meshing Attributes 对话框

❹依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Surf / Contact→Inf Acoustic，会弹出“Create Infinite Acoustic Elements”对话框，单击“OK”

按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，单击“Sele All”按钮，单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，单击“Sele All”按钮，单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

**09 设置分界面。**

❶依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框输入 0.26035，单击“OK”按钮关闭该对话框

❷依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示。在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“By Attributes”，在第三个单选框中选择“Elem type num”，在“Min，Max，Inc”输入框输入 2，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/ANSYS→Field Surface→On Nodes，会弹出“Apply FSI on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮关闭该对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，单击“Sele All”按钮，再单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-35 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，单击“Sele All”按钮，再单击“Cancel”按钮关闭该对话框。

### 11.2.3 求解

❶依次选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，会弹出“New Analysis”对话框，如图 11-38 所示，在“Type of analysis”选择列表中选择“Harmonic”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options，会弹出“Harmonic Analysis”对话框，如图 11-39 所示，在“Solution method”选择列表中选择“Full”，其余采用默认设置。单击“OK”按钮会弹出“Full Harmonic Analysis”对话框，采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes，会弹出“Apply F/M on Nodes”对话框，在输入框输入 19，单击“OK”按钮，会弹出“Apply F/M on Nodes”对话框，如图 11-40 所示，在“Lab Direction of force/mom”选择列表中选择“FX”，在“Apply as”选择列表中选择“Constant value”，在“VALUE Real part of force/mom”输入框输入 1000，单击“OK”按钮关闭该对话框。

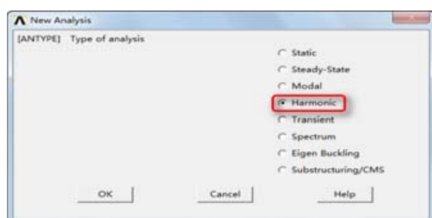


图 11-38 “New Analysis”对话框

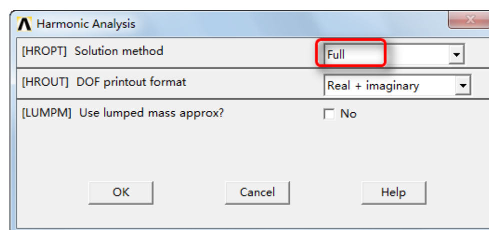


图 11-39 “Harmonic Analysis”对话框

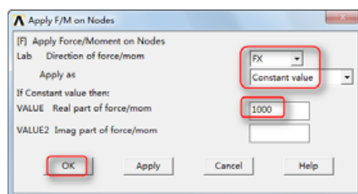


图 11-40 Apply F/M on Nodes 对话框

❹依次选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes，会弹出“Apply F/M on Nodes”对话框，在输入框输入 1019，单击“OK”按钮，会弹出“Apply F/M on Nodes”对话框，如图 11-40 所示，在“Lab Direction of force/mom”选择列表中选择“FX”，在“Apply as”选择列表中选择“Constant value”，在“VALUE Real part of force/mom”输入框输入-1000，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Freq and Substps，会弹出“Harmonic Frequency and Substep Options”对话框，如图 11-41 所示，在“Harmonic freq range”输入框分别输入 34 和 38，在“Number of substeps”输入框输入 100，在“Stepped or ramped b.c.”选择列表中选择“Stepped”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，会弹出“Verify”对话框，如图 11-42 所示，单击“Yes”按钮开始求解。求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。

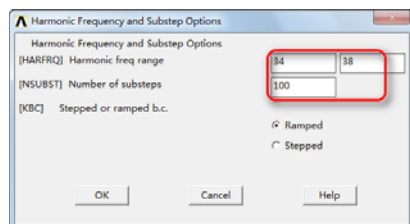


图 11-41 “Harmonic Frequency and Substep Options”对话框

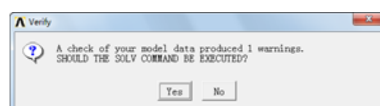


图 11-42 “Verify”对话框

## 📖11.2.4 后处理

❶依次选择 Main Menu→TimeHist Postpro，会弹出“Time History Variables”对话框，如图 11-43 所示，单击关闭按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Main Menu→TimeHist Postpro→Settings→Graph，会弹出“Graph Settings”对话框，如图 11-44 所示，在“Complex variable”选择列表中选择“Amplitude”，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

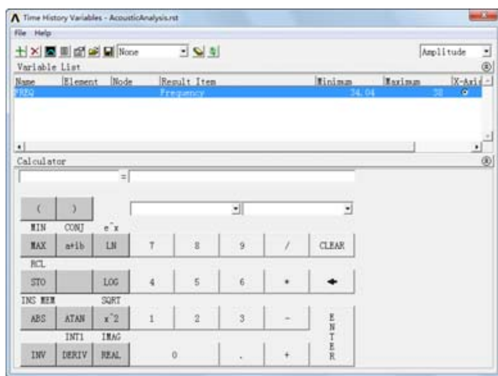



图 11-43 “Time History Variables”对话框

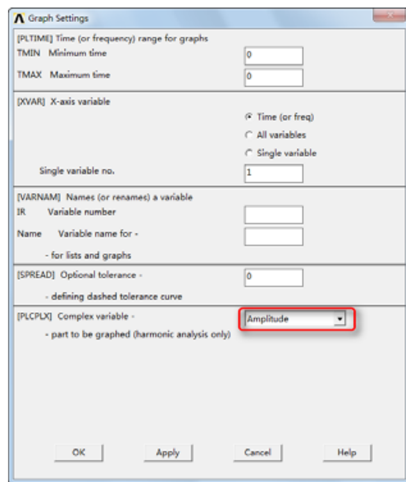
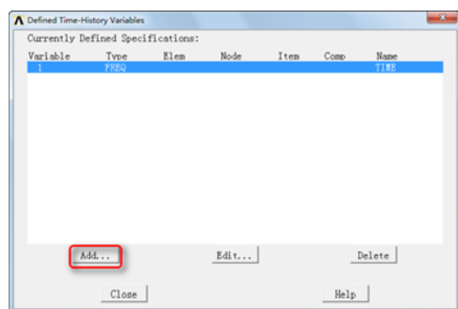



图 11-44 “Graph Settings”对话框

❸依次选择 Main Menu→TimeHist Postpro→Define Variables 命令，会弹出“Defined Time-History Variables”对话框，如图 11-45 所示。

❹单击“Add”按钮，会弹出“Add Time-History Variable”对话框，如图 11-46 所示，在“Type of variable”选择列表中选择“Nodal DOF result”。



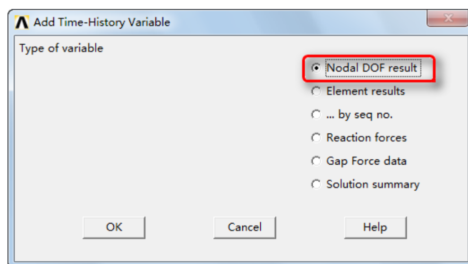




图 11-45 “Defined Time-History Variables”对话框 图 11-46 “Add Time-History Variable”对话框

❺单击“OK”按钮，会弹出“Define Nodal Data”对话框，如图 11-47 所示，在“NVAR Ref number of variable”输入框输入 2，在“NODE Node number”输入框输入 1，在“Item，Comp Data Item”选择列表中选择 DOF solution→Translation UX，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻单击“Close”按钮，关闭“Defined Time-History Variables”对话框。

❼依次选择 Main Menu→TimeHist Postpro→Store Data，会弹出“Store Data from the Results File”对话框，如图 11-48 所示，在“Lab　New data will”选择列表中选择“Merge w/existing”，单击“OK”按钮关闭该对话框。




图 11-47 “Defined Data”对话框

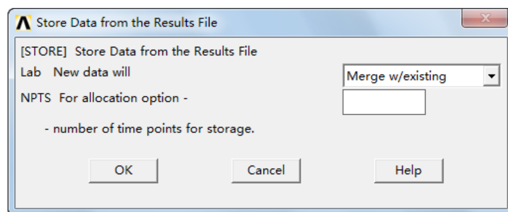



图 11-48 “Store Data from the Results File”对话框

❽依次选择 Main Menu→TimeHist Postpro→Math Operations→Complex Conjugat，会弹出“Complex Conjugate of Time-History Variable”对话框，如图 11-49 所示，在“IR Reference number for result”输入框输入 3，在“FACTA　Factor”输入框输入 1，在“IA Variable”输入框输入 2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

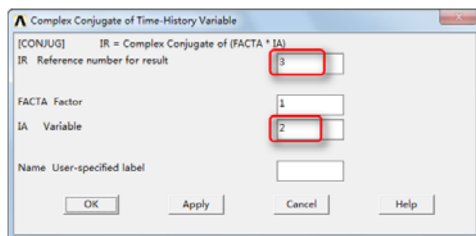



图 11-49 Complex Conjugate of Time-History Variable 对话框

❾依次选择 Main Menu→TimeHist Postpro→Math Operations→Multiply，会弹出“Multiply Time-History Variable”对话框，如图 11-50 所示，在“IR　Reference number for result”输入框输入 4，在“IA　1st Variable”输入框输入 2，在“IB　2nd Variable”输入框输入 3，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

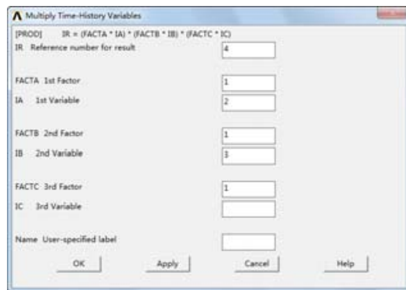



图 11-50 Multiply Time-History Variable 对话框

❿依次选择 Main Menu→TimeHist Postpro→Math Operations→Square Root，会弹出“Square Root of Time-History Variable”对话框，如图 11-51 所示，在“IR　Reference number for result”输入框输入 5，在“FACTA　Factor”输入框输入 1，在“IA　Variable”

输入框输入 4，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫依次选择 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data，会弹出“Get Scalar Data”对话框，如图 11-52 所示，采用默认设置。

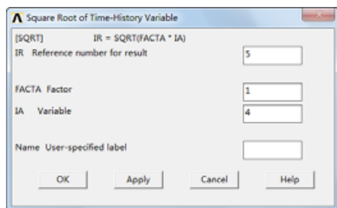



图 11-51 “Square Root of Time-History Variable”对话框

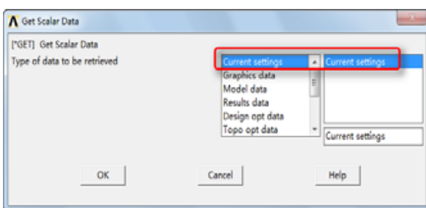



图 11-52 “Get Scalar Data”对话框

⓬单击“OK”按钮，会弹出“Get Current Settings”对话框，如图 11-53 所示，在“Name of parameter to be defined”输入框输入 uxmx，单击“OK”按钮关闭该对话框。

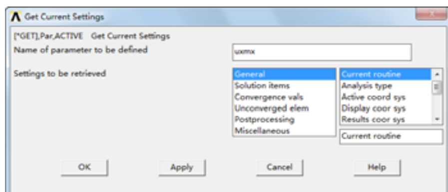



图 11-53 “Get Current Settings”对话框

⓭依次选择 Utility Menu→List→Status→Parameters→Named Parameters，会弹出“Named-Parameter Status”对话框，如图 11-54 所示，在“Par　Name of parameter”选择列表中选择“UXMX”，其余采用默认设置。

⓮单击“OK”按钮，会弹出“STATUS Command”显示文本框，如图 11-55 所示，文本框中给出了节点 1 处的强迫频率为 36Hz。

⓯读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

⓰依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 11-56 所示。

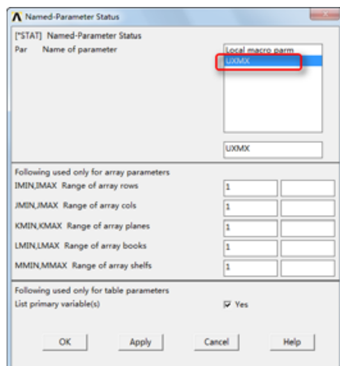



图 11-54 “Named-Parameter Status”对话框

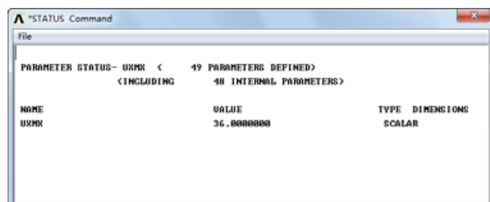



图 11-55 “STATUS Command”显示文本框

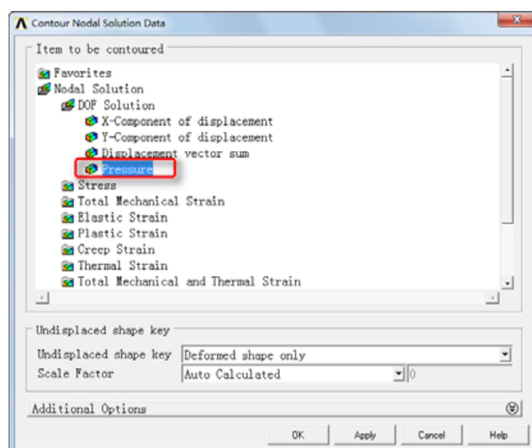



图 11-56 “Contour Nodal Solution Data”对话框

⑰在“Item to be contoured”列表中，选择 Nodal Solution→DOF Solution→Pressure，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 11-57 所示的压力场分布等值线图。

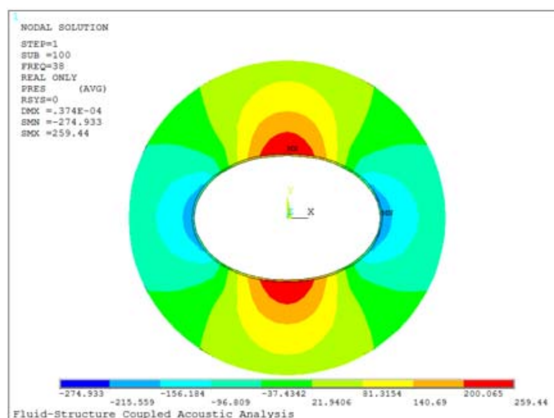



图 11-57 压力场分布等值线图

⑱依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Deformed Shape，会弹出“Plot Deformed Shape”对话框，如图 11-58 所示，在“KUND Items to be plotted”选择列表中选择“Def shape only”。

⑲单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 11-59 所示变化后的网格模型。

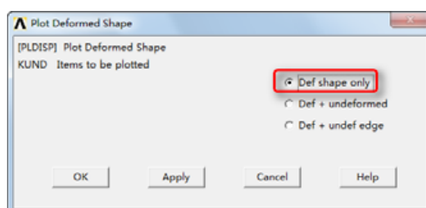



图 11-58 “Plot Defined Shape”对话框

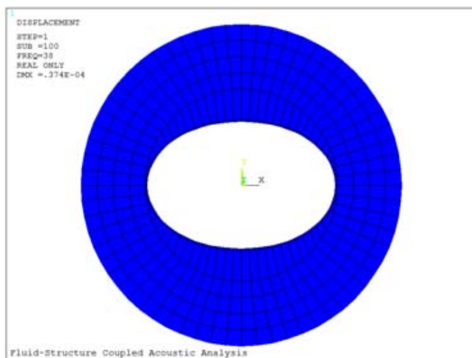



图 11-59 变化后的网格模型

### 11.2.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

## 11.3 房间内的声学分析

### 11.3.1 问题描述

这是一个房间内声学分析的例子，使用 FLUID30 单元来分析房间内的驻波波型。其中，吸声材料位于底部表面，圆柱表面的振动结构位于右上角。当结构振动的激励频率为 80Hz 时，这个例子可以确定声波的压力波型。

几何模型示意图如图 11-60 所示。

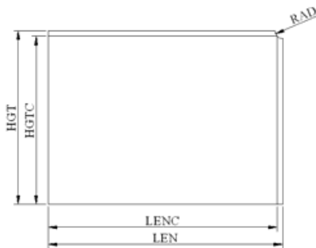



图 11-60 几何模型示意图（平面）

其中：LEN=27

LENC=26.3636039

HGT=20

HGTC=19.3636039

RAD=0.9

### 11.3.2 前处理

**01** 定义工作名和工作标题。

❶定义工作文件名：依次选择 Utility Menu→File→Change Jobname，会出现“Change Jobname”对话框，在对话框中输入工作文件名“Room Acoustic Analysis”，并将“NEW log and error files？”设置为“Yes”，如图 11-61 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❷定义工作标题：依次选择 Utility Menu→File→Change Title，会出现“Change Title”对话框，在对话框中输入工作标题“Harmonic Analysis - Room Acoustics”，如图 11-62 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

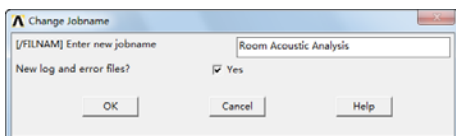



图 11-61 “Change Jobname”对话框

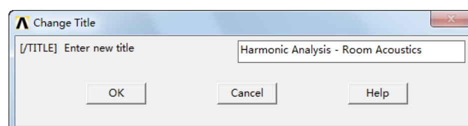



图 11-62 “Change Title”对话框

❸设置参数：依次选择 Main Menu→Preferences，会出现“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择 Structual、ANSYS Fluid 和 FLOTRAN CFD，如图 11-63 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

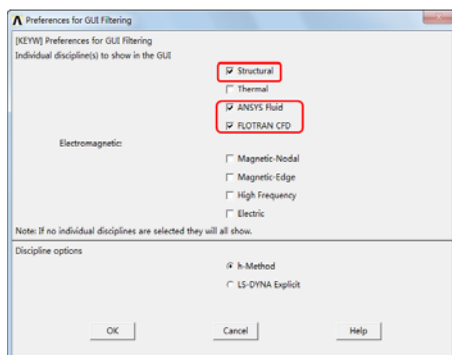



图 11-63 “Preferences for GUI Filtering”对话框

**02 定义单元类型。**

❶指定单元类型：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，会弹出“Element Types”对话框，如图 11-64 所示。

❷单击“Add”按钮，会弹出“Library of Element Types”对话框。

❸在“Library of Element Types”列表框中选择 ANSYS Fluid 和 3D acoustic 30，在“Element type reference number”输入框中输入 1，如图 11-65 所示。

❹单击“Apply”按钮会再次弹出“Library of Element Types”对话框，如图 11-65 所示，在“Library of Element Types”列表框中选择“ANSYS Fluid”和 3D acoustic 30，在“Element type reference number”输入框中输入 2，单击“OK”按钮关闭“Library of Element Types”对话框。设置完成之后“Element Types”对话框如图 11-66 所示。

❺选取“Element Types”对话框中的“Type 2 FLUID30”，单击“Options”按钮，会弹出“FLUID30 element type options”对话框，如图 11-67 所示，在“Structure at elem interface K2”选择列表中选择“Structure absent”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻单击“Close”按钮，关闭“Element Types”对话框。



图 11-64 “Element Types”对话框

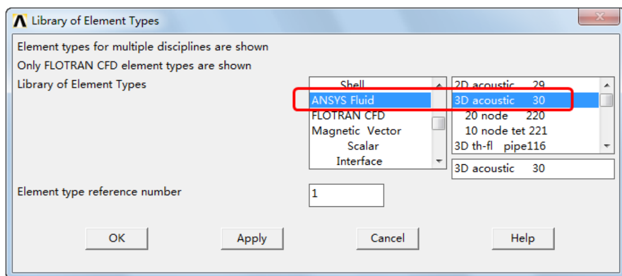



图 11-65 “Library of Element Types”对话框

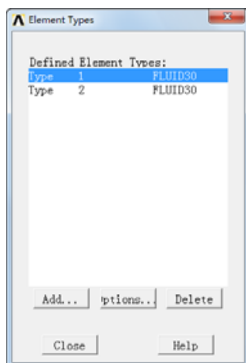



图 11-66 设置完成后单元类型对话框

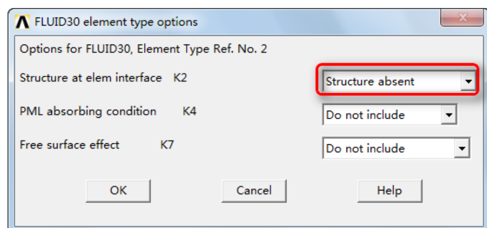



图 11-67 “FLUID30 element type options”对话框

**03 建立几何模型。**

❶依次选择 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，会弹出“Scalar Parameters”对话框，如图 11-68 所示。在“Select”输入框中依次输入：

```
XDIV=29;
YDIV=19;
ZDIV=1;
CDIV=2;
LEN=27;
HGT=20;
RAD=0.9;
PI04=0.785398163;
LENC=26.3636039;
HGTC=19.3636039。
```



每次输入完之后单击“Apply”按钮，全部输入完成之后单击“Close”按钮关闭该对话框。

❷依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active C，会弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT Keypoint number”输入框输入 1，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输

入 0，0，0。

❸单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 2，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 LEN，0，0。

❹单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 3，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 LEN，HGT，0。

❺单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 4，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 0，HGT，0。

❻单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 5，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 0，0，-1。

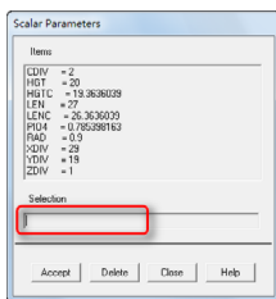



图 11-68 “Scalar Parameters”对话框

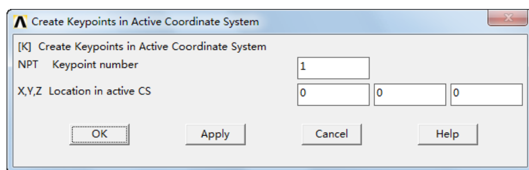



图 11-69 “Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框

❼单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 6，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 LEN，0，-1。

❽单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 7，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 LEN，HGT，-1。

❾单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT　Keypoint number”输入框输入 8，在“X，Y，Z　Location in active CS”输入框依次输入 0，HGT，-1。

❿依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 1，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 5，单击“OK”按钮会生成线段 L1。



单击“OK”按钮还会弹出“Note”对话框，单击“OK”按钮关闭即可。

⓫依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 2，单击“OK”按钮，会再

次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 6，单击“OK”按钮会生成线段 L2。

⑫依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 3，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 7，单击“OK”按钮会生成线段 L3。

⑬依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 4，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 8，单击“OK”按钮会生成线段 L3。

⑭依次选择 Utility Menu→WorkPlane→Offset WP by Increments，会弹出“Offset WP”对话框，如图 11-70 所示，在“Snaps　X，Y，Z Offsets”输入框输入 27，20，在“XY，YZ，ZX Angles”输入框输入 270，180，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑮依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→By Cent & Radius，会弹出“Arc by Center & Radius”对话框，如图 11-71 所示，在第三栏中选择“WP　Coordinates”，在输入框输入 0。

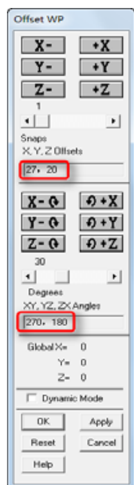



图 11-70　“Offset WP”对话框

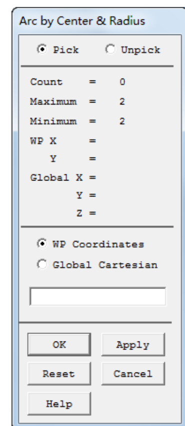



图 11-71　“Arc by Center & Radius”对话框

⑯单击“OK”按钮，会再次弹出“Arc by Center & Radius”对话框，如图 11-71 所示，在第三栏中选择“WP　Coordinates”，在输入框输入 0.9。



单击“OK”按钮还会弹出 Note 对话框，单击“OK”按钮关闭即可。

⑰单击“OK”按钮，会弹出“Arc by Center & Radius”对话框，如图 11-72 所示，在“ARC　Arc length in degrees”输入框输入 90，在“NSEG　Number of lines in arc”输入框输入 2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑱依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Lines→Along Lines，会弹出“Sweep Lines alon…”对话框，如图 11-73 所示，在第三栏中选择“List of Items”，在输入框输入 5，6。

⑲单击“OK”按钮，会再次弹出“Sweep Lines alon…”对话框，如图 11-73 所示，

在第三栏中选择“List of Items”，在输入框输入 3，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，会弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT Keypoint number”输入框输入 15，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入 0，HGTC，0。

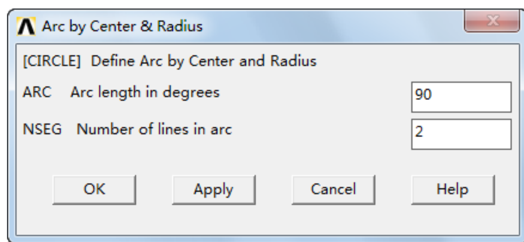



图 11-72 “Area by Center & Radius”对话框

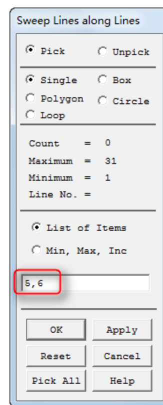



图 11-73 “Sweep Lines alon…”对话框

㉑单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT Keypoint number”输入框输入 16，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入 0，HGTC，-1。

㉒单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT Keypoint number”输入框输入 17，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入 LENC，0，0。

㉓单击“Apply”按钮，会再次弹出“Create Keypoints in Active Coordinate System”对话框，如图 11-69 所示，在“NPT Keypoint number”输入框输入 18，在“X，Y，Z Location in active CS”输入框依次输入 LENC，0，-1。

㉔依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 1，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 17，单击“OK”按钮会生成线段。

㉕依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 10，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 15，单击“OK”按钮会生成线段。

㉖依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 11，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 4，单击“OK”按钮会生成线段。

㉗依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 17，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 10，单击“OK”按钮会生成线段。

㉘依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active

Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 1，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 15，单击“OK”按钮会生成线段。

㉙依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 2，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 9，单击“OK”按钮会生成线段。

㉚依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 5，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 18，单击“OK”按钮会生成线段。

㉛依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 13，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 16，单击“OK”按钮会生成线段。

㉜依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 8，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 14，单击“OK”按钮会生成线段。

㉝依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 13，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 18，单击“OK”按钮会生成线段。

㉞依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 5，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 16，单击“OK”按钮会生成线段。

㉟依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，会弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 6，单击“OK”按钮，会再次弹出“Lines in Active…”对话框，在输入框输入 12，单击“OK”按钮会生成线段。

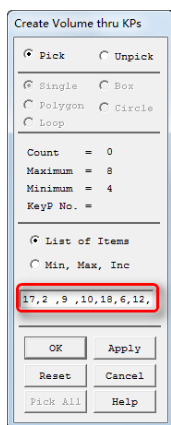



图 11-74 “Create Volume thru KPs”对话框

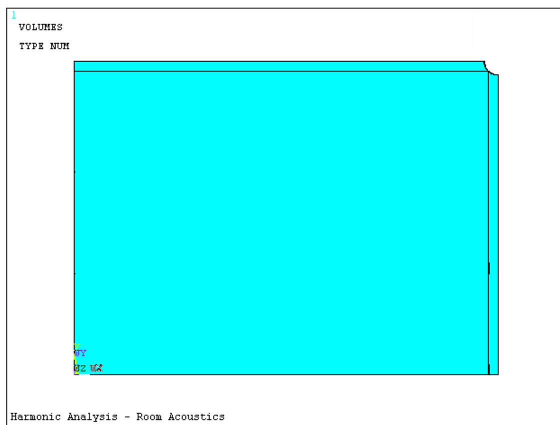



图 11-75 XY 面上的几何模型

㊱依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Arbitrary→Through KPs，会弹出“Create Volume th…”对话框，如图 11-74 所示，在输入框输入关键点 1，17，10，15，5，18，13，16，单击“OK”按钮会生成体并关闭该对话框。

㊲依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Arbitrary→Through KPs，会弹出“Create Volume th…”对话框，如图 11-74 所示，在输入框输入关键点 15，10，11，4，16，13，14，8，单击“OK”按钮会生成体并关闭该对话框。

㊳依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Arbitrary→Through KPs，会弹出“Create Volume th…”对话框，如图 11-74 所示，在输入框输入关键点 17，2，9，10，18，6，12，13，单击“OK”按钮会生成体并关闭该对话框。

㊴依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Colors→Reverse Video，ANSYS 显示窗口将变成白色。依次选择 Utility Menu→Plot→Areas 将显示所生成的几何模型，生成的 XY 面上的几何模型如图 11-75 所示。

㊵单击 ANSYS 界面右边的（Isometric View）按钮，三维几何模型如图 11-76 所示。

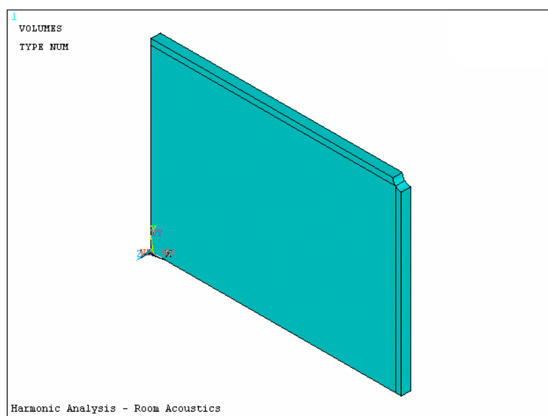



图 11-76 三维几何模型

**04** 划分网格。

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，会弹出“Plot Numbering Controls”对话框，单击“LINE Line numbers”后的方框，使其状态从“Off”变为“On”，其余选项采用默认设置，如图 11-77 所示，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on Picked Lines”对话框，在输入框输入 L12、L13、L14、L18、L19 和 L20。

❹单击“OK”按钮会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 11-78 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 XDIV，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on Picked Lines”对话框，在输入框输入 L15、L16、L17、L21、L22 和 L23。

❻单击“OK”按钮会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 11-78 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 YDIV，单击“OK”按钮关闭该

对话框。

❼依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines，会弹出“Element Size on Picked Lines”对话框，在输入框输入 L5、L6、L7 和 L10。

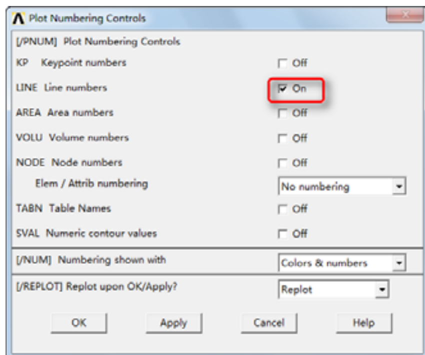



图 11-77 “Plot Numbering Controls”对话框

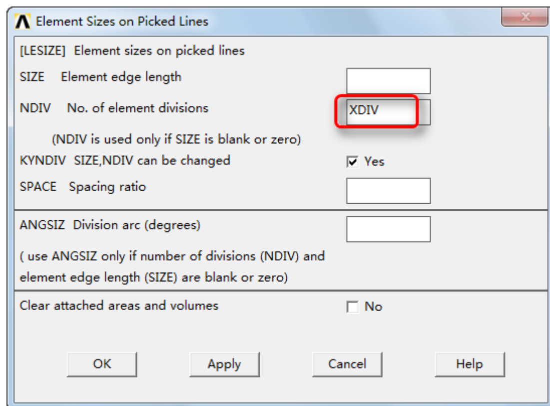



图 11-78 “Element Sizes on Picked Lines”对话框

❽单击“OK”按钮会弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框，如图 11-78 所示，在“NDIV No. of element divisions”输入框输入 CDIV，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Mapped→4 to 6 side，会弹出“Mesh Volumes”对话框，单击“Pick All”按钮划分网格并关闭该对话框。生成网格后的二维和三维模型分别如图 11-79 和 11-80 所示。

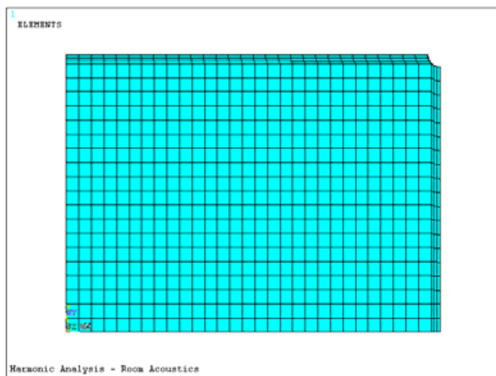



图 11-79 生成网格后二维几何模型

**05** 定义材料属性。

❶依次选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，会弹出“Define Material Model Behavior”对话框，如图 11-81 所示。

❷在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Acoustics→Density，会弹出“Density for Material Number 1”对话框，如图 11-82 所示，在“DENS”输入框输入 2.35e-3，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Acoustics→Sonic Velocity，会弹出“Sonic Velocity for Material Number 1”对话框，如图 11-83 所示，在“SONC”输入框输入 1100，单击“OK”按钮关闭该对话框。

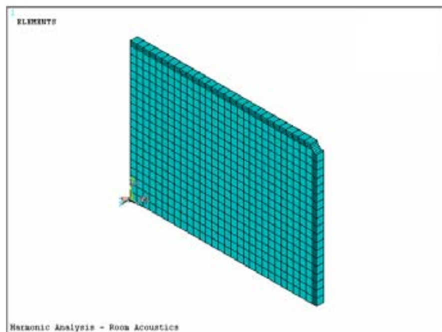



图 11-80 生成网格后三维几何模型

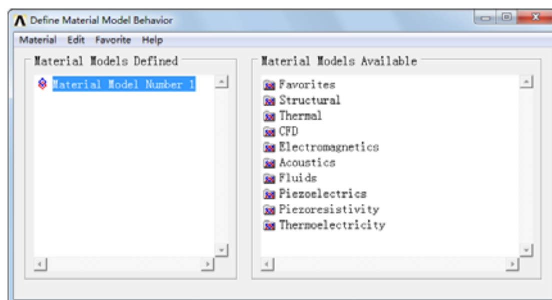



图 11-81 “Define Material Model Behavior”对话框

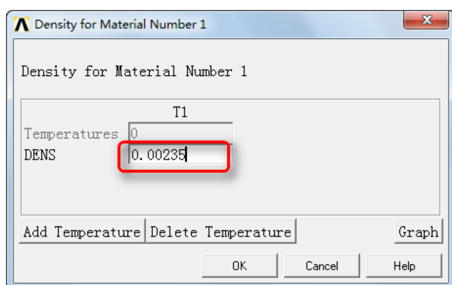



图 11-82 “Density for Material Number 1”对话框

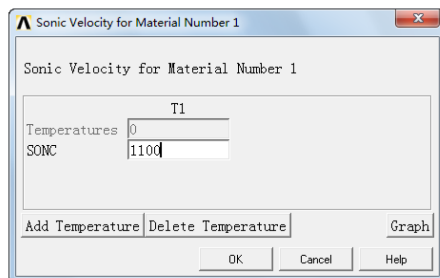



图 11-83 “Sonic Velocity for Material Number 1”对话框

❹在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Acoustics→Boundary Admittance，会弹出“Boundary Admittance for Material Number 1”对话框，如图 11-84 所示，在“MU”输入框输入 0.04，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❺单击“Define Material Model Behavior”对话框菜单栏中 Material→New Model，会弹出“Define Material ID”对话框，如图 11-85 所示，在“Define Material ID”输入框输入 2，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❻单击 Material Models Defined→Material Model Number 2，然后再在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Acoustics→Density，会弹出“Density for Material

Number 2”对话框，如图 11-82 所示，在“DENS”输入框输入 2.35e-3，单击“OK”按钮关闭该对话框。

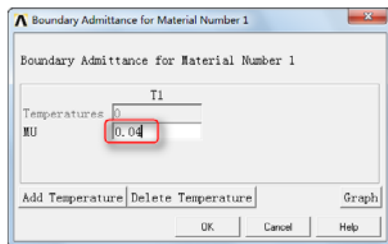



图 11-84 “Boundary Admittance for Material Number 1”对话框

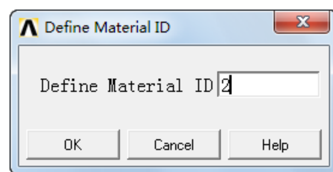



图 11-85 “Define Material ID”对话框

❼在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Acoustics→Sonic Velocity，会弹出“Sonic Velocity for Material Number 2”对话框，如图 11-83 所示，在“SONC”输入框输入 1100，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❽在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Acoustics→Boundary Admittance，会弹出“Boundary Admittance for Material Number 2”对话框，如图 11-84 所示，在“MU”输入框输入 0.7，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❾单击“Define Material Model Behavior”对话框菜单栏中 Material→New Model，会弹出“Define Material ID”对话框，如图 11-85 所示，在“Define Material ID”输入框输入 3，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❿单击 Material Models Defined→Material Model Number 3，然后再在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Acoustics→Density，会弹出“Density for Material Number 3”对话框，如图 11-82 所示，在“DENS”输入框输入 2.35e-3，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓫在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Acoustics→Sonic Velocity，会弹出“Sonic Velocity for Material Number 3”对话框，如图 11-83 所示，在“SONC”输入框输入 1100，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓬在“Material Model Available”选择列表中依次选择 Acoustics→Boundary Admittance，会弹出“Boundary Admittance for Material Number 3”对话框，如图 11-84 所示，在“MU”输入框输入 0，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⓭依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓮依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 12，15，在第四个单选框中选择“Reselect”，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓯依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图

11-87 所示，在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Nodes”，在第四个单选框中选择“From Full”，单击“OK”按钮关闭对话框。

⓰依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，会弹出“Elements Attributes”对话框，如图 11-88 所示，在“Material Number”选择列表中选择 2，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

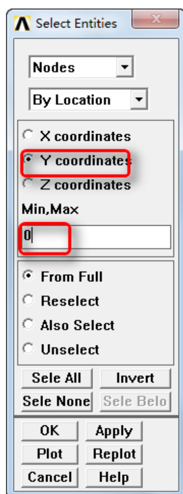



图 11-86 “Select Entities”对话框

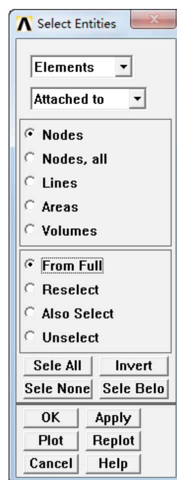



图 11-87 “Select Entities”对话框

⓱依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move / Modify→Elements→Modify Attrib，会弹出“Modify Elem Attributes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Modify Elem Attributes”对话框，如图 11-89 所示，采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

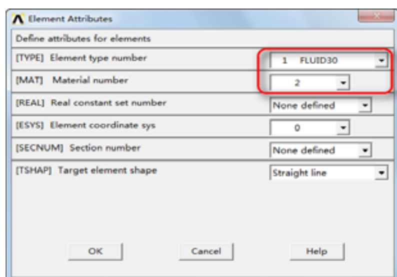



图 11-88 “Elements Attributes”对话框

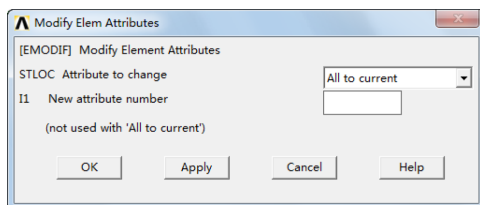



图 11-89 “Modify Elem Attributes”对话框

**06** 设置边界条件。

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭对话框。

❸依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，在第四个单选框中选择“Also Select”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❹依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 LEN，在第四个单选框中选择“Also Select”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❺依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 HGT，在第四个单选框中选择“Also Select”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❻依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，会弹出“Apply U，ROT on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply U，ROT on Nodes”对话框，如图 11-90 所示，在“Lab DOFs to be contrained”选择列表中选择“UX，UY，UZ”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❼依次选择 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc，会弹出“Create CS at Location”对话框，在输入框输入 11，单击“OK”按钮，会弹出“Create Local CS at Specified Location”对话框，如图 11-91 所示，在“KCN Ref number of new coord sys”输入框输入 11，在“NCS Type of coordinate system”选择列表中选择“Cylindrical 1”，在“XC，YC，ZC Origin of coord system”输入框依次输入 27，20，单击“OK”按钮关闭该对话框。

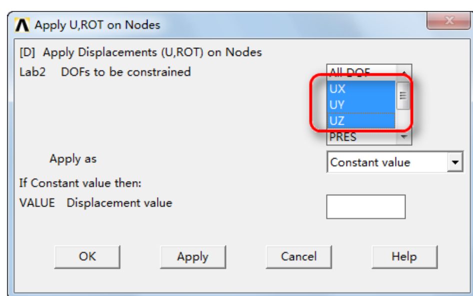



图 11-90 “Apply U，ROT on Nodes”对话框

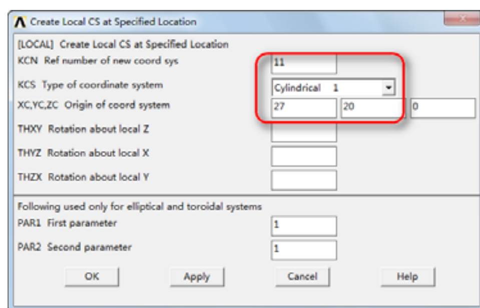



图 11-91 “Create Local CS at Specified Location”对话框

❽依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 RAD，在第四个单选框中选择“Also Select”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❾依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-87 所示，在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，

在第三个单选框中选择“Nodes”，在第四个单选框中选择“From Full”，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑩依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-92 所示，在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“By Num/Pick”，在第三个单选框中选择“From Full”，单击“Invert”按钮，单击“Cancel”按钮关闭对话框。

⑪依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，会弹出“Elements Attributes”对话框，如图 11-88 所示，在“Element type number”选择列表中选择“2 FLUID30”，在“Material Number”选择列表中选择 2，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑫依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move / Modify→Elements→Modify Attrib，会弹出“Modify Elem Attributes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Modify Elem Attributes”对话框，如图 11-89 所示，采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑬依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 RAD，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑭依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-87 所示，在第一个下拉框中选择“Elements”，在第二个下拉框中选择“Attached to”，在第三个单选框中选择“Nodes”，在第四个单选框中选择“From Full”，单击“OK”按钮关闭对话框。

⑮依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/ANSYS→Field Surface→On Nodes，会弹出“Apply FSI on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮关闭该对话框。

⑯依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→RotateNode→To Active CS，会弹出“Rotate Nodes interface”对话框，单击“Pick All”按钮关闭该对话框。

⑰依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，会弹出“Apply U，ROT on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply U，ROT on Nodes”对话框，如图 11-90 所示，在“Lab DOFs to be contrained”选择列表中选择“UX”，在“VALUE Real part of disp”输入 0.01。

⑱单击“Apply”按钮，会再次弹出“Apply U，ROT on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply U，ROT on Nodes”对话框，如图 11-90 所示，在“Lab DOFs to be contrained”选择列表中选择“UY，UZ”，将“VALUE Real part of disp”输入框清空，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑲依次选择 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cartesian，依次选择 Utility Menu→Select→Everything 命令。

⑳依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉑依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 LEN，在第四个单选框中选择“Also Select”，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉒依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“Y coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 0，在第四个单选框中选择“Also Select”，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉓依次选择 Utility Menu→Select→Entities，会弹出“Select Entities”对话框，如图 11-86 所示，在第一个下拉框中选择“Nodes”，在第二个下拉框中选择“By Location”，在第三个单选框中选择“X coordinates”，在“Min，Max”输入框中输入 HGT，在第四个单选框中选择“Also Select”，单击“OK”按钮关闭对话框。

㉔依次选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Fluid/ANSYS→Impedance→On Nodes，会弹出“Apply IMPD on Nodes”对话框，单击“Pick All”按钮，会弹出“Apply IMPD on Nodes”对话框，如图 11-93 所示，在“VALUE Impedance value”输入框输入 1，单击“OK”按钮关闭该对话框。




图 11-92 “Select Entities”对话框

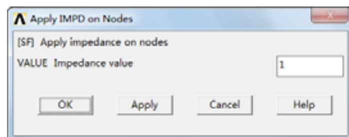



图 11-93 “Apply IMPD on Nodes”对话框

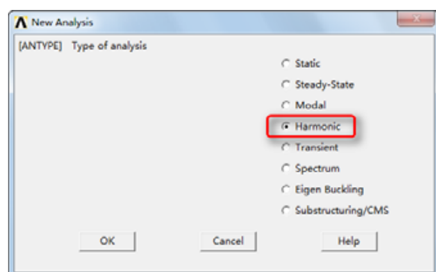
## 11.3.3 求解

❶依次选择 Utility Menu→Select→Everything。

❷依次选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，会弹出“New Analysis”对话框，如图 11-94 所示，选择“Harmonic”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❸依次选择 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Freq and Substps，会弹出“Harmonic Frequency and Substep Options”对话框，如图 11-95 所示，在“Harmonic freq range”输入框依次输入 80，80，其余采用默认设置，单击“OK”按钮关闭该对话框。

❹依次选择 Main Menu→Solution→Run FLOTRAN，开始求解。求解完成后会弹出提示对话框，单击“Close”按钮关闭。



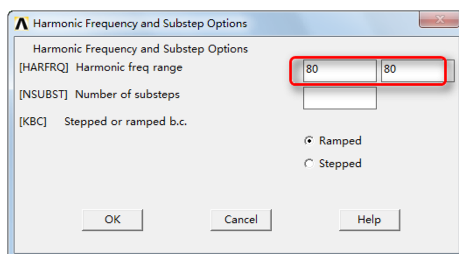




图 11-94 “New Analysis”对话框　图 11-95 “Harmonic Frequency and Substep Options”对话框

## 11.3.4 后处理

❶读入计算结果：依次选择 Main Menu→General PostProc→Read Results→Last Set，读取最后一次迭代的计算结果。

❷依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solution，会弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 11-96 所示。

❸在“Item to be contoured”列表中，选择 Nodal Solution→DOF Solution→Pressure，单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 11-97 所示的压力场分布等值线图。

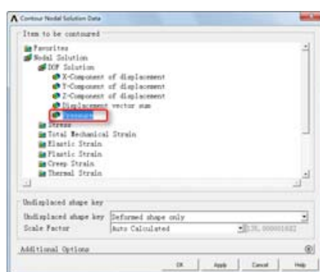


图 11-96 “Contour Nodal Solution Data”对话框

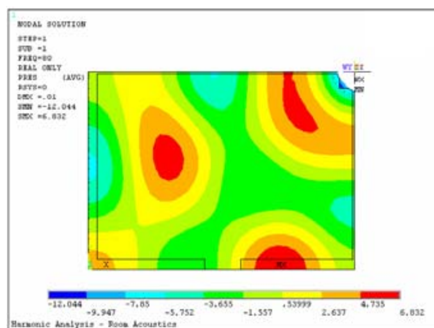



图 11-97 压力场分布等值线图

❹单击 ANSYS 界面右边的（Isometric View）按钮将显示三维压力场分布等值线图，如图 11-98 所示。

❺依次选择 Main Menu→General PostProc→Plot Results→Deformed Shape，会弹出

“Plot Deformed Shape”对话框，如图 11-99 所示，在“KUND Items to be plotted”选择列表中选择“Def shape only”。

❻单击“OK”按钮，ANSYS 窗口将显示如图 11-100 所示变化后的网格模型。

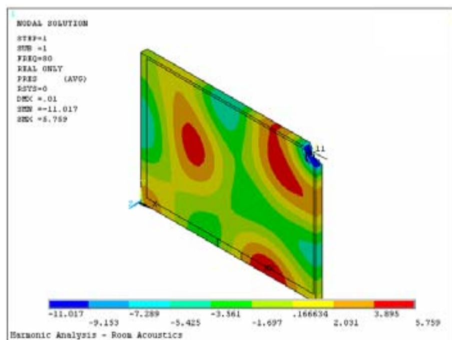



图 11-98 三维压力场分布等值线图

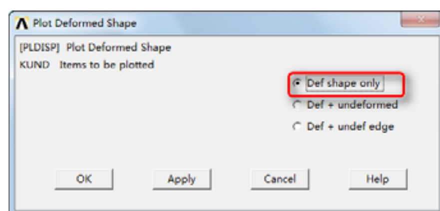



图 11-99 “Plot Deformed Shape”对话框

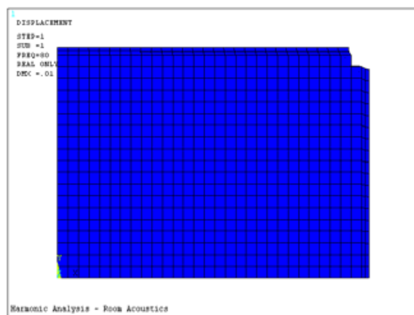



图 11-100 变化后的网格模型

## 11.3.5 命令流模式

命令流见随书光盘文件，这里不再赘述。

**责任编辑：曲彩云**
**封面设计：王　玮**

## ANSYS工程应用系列丛书

# ANSYS

**《ANSYS 14.0/FLOTRAN 流场分析从入门到精通》**

FLUENT 14.0流场分析从入门到精通
ANSYS 14.0有限元分析从入门到精通
ANSYS 14.0热力学有限元分析从入门到精通
ANSYS 14.0热磁学有限元分析从入门到精通
ANSYS 14.0土木工程有限元分析从入门到精通
ANSYS Workbench 14.0有限元分析从入门到精通
ANSYS 14.0机械与结构有限元分析从入门到精通
ANSYS 14.0多物理耦合场有限元分析从入门到精通
ANSYS 14.5/LS-DYNA非线性有限元分析实例指导教程

**上架指导：计算机 CAD/CAM/CAE**

ISBN 978-7-111-44902-7

地　　址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心：(010)88361066
销售一部：(010)68326294
销售二部：(010)88379649
读者购书热线：(010)88379203

邮政编码：100037
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版




**定价：66.00（含1DVD）**